US Army Corps
of Engineers

AC 150/5370-14A
Appendix 1

Pavimentación con Mezcla Asfáltica en Caliente

Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte
Administración Federal de Aviación
Administración Federal de Carreteras
Asociación Nacional de Pavimentos de Asfalto
Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos
Asociación Americana de Obras Públicas
Asociación Nacional de Ingenieros de Condados

MANUAL 2000

“Este documento es una traducción no autorizada de un documento de libre acceso que se decidió traducir como insumo de consulta para los estudiantes de la carrera de ingeniería civil.”

Manual de Pavimentación con Mezcla Asfáltica en Caliente 2000

Comité de supervisión del Manual de Pavimentación con Mezcla Asfáltica Caliente 2000

E. Ray Brown, *Chairman*, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Alabama Steven L. Brandau, Henry County Highway Department, Cambridge, Illinois
Harry H. Bush, Jr., Vulcan Materials, Inc., San Antonio, Texas Ervin L. Dukatz, Jr., Mathy Construction Co., Onalaska, Wisconsin Rita B. Leahy, Fugro-BRE, Inc., Austin, Texas
Bernie M. McCarthy, Asphalt Institute, Bethesda, Maryland
Larry Michael, Maryland Department of Transportation, Hancock, Maryland Carl L. Monismith, University of California-Berkeley
Robert D. Tholt, Montana Department of Transportation, Helena, Montana

Representantes de enlace

Anthony Giancola, National Association of County Engineers, Washington, D.C. Kent Hansen, National Asphalt Pavement Association, Lanham, Maryland Gregory W. Hughes, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
Ken F. Kobetsky, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. Mike Rafalowski, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
Jeffrey L. Rapol, Federal Aviation Administration, Washington, D.C. James Sorenson, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Consultantes

James A. Scherocman, Cincinnati, Ohio Ronald J. Cominsky, Harrisburg, Pennsylvania

Personal del TBR

Robert E. Skinner, Jr., Executive Director Neil F. Hawks, Director for Special Programs Linda S. Mason, Project Manager
Rona Briere, Editor
Cynthia Baker, Administrative Assistant

Impreso en los Estados Unidos de América
Número de tarjeta de catálogo de la Biblioteca del Congreso LC 00-135314
ISBN 0-309-07157-7

PREFACIO

En el año 2000, se gastarán en Estados Unidos más de 20.000 millones de dólares en la construcción de pavimentos asfálticos para carreteras y aeropuertos. En un período en el que las demandas de rendimiento de los pavimentos están aumentando de forma espectacular, los contratistas de pavimentación asfáltica, las agencias públicas y la comunidad de investigación en pavimentación comparten la opinión de que debe prestarse el máximo cuidado a la correcta construcción de estos pavimentos. También es importante que las mejoras resultantes de los hallazgos significativos de la investigación y los avances tecnológicos se incorporen a la práctica de pavimentación de asfalto con mezcla en caliente de manera oportuna. Los expertos en pavimentos están de acuerdo, sin embargo, en que las agencias de carreteras y aeropuertos y sus contratistas de pavimentos tienen dificultades no sólo para incorporar la nueva tecnología y los resultados de la investigación a la práctica de campo, sino también para aplicar sistemáticamente los procedimientos probados de la experiencia de investigación anterior.

La capacitación también es un problema en esta industria descentralizada, en la que muchos productores y contratistas operan a una escala demasiado pequeña como para realizar inversiones a largo plazo en el desarrollo del personal. Como resultado, los conocimientos y la experiencia del personal de campo no suelen estar al día, y la calidad de los pavimentos a menudo no satisface las exigencias modernas de rendimiento.

En respuesta a las recomendaciones de la industria, el gobierno y los responsables académicos, la primera edición del *Manual de Pavimentación con Mezcla Asfáltica Caliente* fue preparada por el Consejo de Investigación del Transporte (TRB) en 1991 con el apoyo financiero de la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte, la Administración Federal de Aviación, la Administración Federal de Carreteras, la Asociación Nacional de Pavimentos de Asfalto y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Aunque los manuales y guías de campo estaban disponibles en muchas fuentes, ninguno había sido adoptado por todos los principales segmentos de la industria. Desde su aparición, el *Manual de Pavimentación con Mezcla Asfáltica Caliente* ha sido ampliamente aceptado como una ayuda de capacitación estándar en los principales segmentos de la industria de la pavimentación. Como resultado, se ha aliviado una gran confusión entre el personal de los contratistas y la especificación de las agencias con respecto a las prácticas de pavimentación.

En la década de 1990, las prácticas de pavimentación con asfalto evolucionaron rápidamente, y el TRB actualizó el manual a solicitud de sus patrocinadores para abordar esta evolución.

Esta segunda edición del manual aborda los hallazgos de investigaciones recientes, incluidos los del Programa Estratégico de Investigación de Carreteras, nuevos equipos de pavimentación, el crecimiento del reciclaje, los cambios en las prácticas de control de calidad y la introducción de nuevas técnicas de Europa y otros lugares. Esta edición también utiliza las unidades de medida (métricas) habituales estadounidenses e internacionales del sistema.

Al igual que la primera edición, este manual está siendo aprobado técnicamente y distribuido como guía general para la construcción de pavimentos asfálticos por sus patrocinadores financieros. También está disponible a través de la Asociación Americana de Obras Públicas y la Asociación Nacional de Ingenieros de Condados.

Este manual cubre el estado del arte de la pavimentación de asfalto, incluidas las operaciones de la planta, el transporte de materiales, la preparación de la superficie, la colocación, la compactación y los procesos de control de calidad. Está dirigido al personal de campo que es responsable de estas operaciones – al personal del contratista que realiza el trabajo y el personal de la agencia que supervisa e inspecciona el trabajo. Se espera que el manual continúe promoviendo una comprensión común de los procesos involucrados y, por lo tanto, resulte en una mejor construcción de pavimentos asfálticos.

El manual no está destinado a cubrir aspectos administrativos, procedimientos de contratación, investigación de sitios, diseño geométrico, diseño estructural o diseño de mezclas, aunque se incluye algo de información general sobre administración de contratos y diseño de mezclas. Por lo tanto, las políticas y procedimientos existentes de las agencias tendrán prioridad en estas áreas.

Para llevar a cabo esta actualización, el Consejo Nacional de Investigación (NRC, por sus siglas en inglés) nombró un comité de estudio presidido por E. Ray Brown, Director del Centro Nacional de Tecnología del Asfalto de la Universidad de Auburn. El comité, con miembros conocedores de los diversos aspectos de las prácticas de construcción de pavimentos asfálticos y que representan a agencias, productores y contratistas, ha preparado esta actualización con la asistencia de James A. Scherocman y Ronald J. Cominsky. El Sr. Scherocman también participó en la preparación de la primera edición del manual.

Este manual ha sido revisado en su versión preliminar por individuos seleccionados por sus diversas perspectivas y experiencia técnica, de acuerdo con los procedimientos aprobados por el Comité de Revisión de Informes de la NRC. El propósito de esta revisión independiente es proporcionar comentarios sinceros y críticos que ayuden a la institución a garantizar que el informe publicado sea lo más sólido posible y que cumpla con los estándares institucionales de objetividad, evidencia y respuesta al objetivo del estudio. Los comentarios de la revisión y el borrador del manuscrito permanecen confidenciales para proteger la integridad del proceso deliberativo.

Se expresa agradecimiento a las siguientes personas por su participación en la revisión de este informe: Timothy B. Aschenbrener, Departamento de Transporte de Colorado; Lester A. Hoel, Universidad de Virginia; Gerald Huber, Heritage Research Group; Byron E. Ruth, Universidad de Florida; y Randy C. West, APAC, Inc. Si bien estas personas han proporcionado comentarios y sugerencias constructivas, es importante enfatizar que la responsabilidad del contenido final de este manual recae completamente en el comité autor y la institución.

La Junta de Investigación en Transporte (Transportation Research Board) es una unidad del Consejo Nacional de Investigación (National Research Council), el cual es la principal agencia operativa de la Academia Nacional de Ciencias (National Academy of Sciences) y la Academia Nacional de Ingeniería (National Academy of Engineering). El Consejo Nacional de Investigación proporciona asesoramiento independiente sobre asuntos científicos y técnicos, en virtud de una carta constitutiva otorgada por el Congreso a la Academia Nacional de Ciencias, una institución privada y sin fines de lucro dedicada al avance de la ciencia y la tecnología, así como a su aplicación para el bienestar general.

CONTENIDO

PARTE I Organización del Proyecto, Diseño de Mezcla y Control de Calidad

1 INTRODUCCIÓN **3**
Propósito y Organización del Manual **3**
Definición de Mezcla Asfáltica en Caliente **3**
Mano de Obra **6**

2 ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO **7**
Documentos del Proyecto **7**
Conferencia Previa a la Construcción **8**
Comunicación Continua **8**
Registros del Proyecto **9**
Seguridad **12**

3 DISEÑO DE LA MEZCLA Y FÓRMULA DE MEZCLA PARA EL TRABAJO **14**
Cemento Asfáltico: Sistemas de Clasificación y Propiedades **14**
Características y Propiedades de los Agregados **15**
Procedimientos de Diseño de Mezcla **19**
Mezclas Producidas en Laboratorio y en Planta **23**
Sumario **26**
Referencias **26**

4 CONTROL DE CALIDAD / GARANTÍA DE CALIDAD **28**
Definiciones **28**
Especificaciones de Métodos **29**
Especificaciones de Control de Calidad / Garantía de Calidad **32**
Sumario **38**
Referencias **38**

PARTE II Operaciones de Planta de Mezcla asfáltica

5 TIPOS DE PLANTAS DE ASFALTO: VISIÓN GENERA **41**
Plantas por Lotes **41**
Plantas de Mezcla en Tambor de Flujo Paralelo **42**
Plantas de Mezcla en Tambor de Flujo Contrapuesto **47**

6 ALMACENAMIENTO Y MANIPULACIÓN DE AGREGADOS **50**
Acumulaciones de Agregados **50**
Sistemas de Alimentación en Frío para Agregados Nuevos **52**

Sistemas de Alimentación en Frío para Pavimento Asfáltico Recuperado **57**
Adición de Cal Hidratada **59**
Calibración **59**
Sumario **60**

7 SISTEMA DE SUMINISTRO DE CEMENTO ASFÁLTICO **62**
Tanques de Almacenamiento **62**
Sistema de Bomba y Medidor **63**
Calibración **65**
Adición de Materiales Líquidos Anti-Delaminación **66**
Sumario **66**

8 PLANTAS POR LOTES **67**
Manipulación de Agregados **67**
Sistema de Suministro de Cemento Asfáltico **68**
Calentamiento y Secado de Agregados **68**
Cribado y Almacenamiento de Agregados Calientes **69**
Mezcla de Agregados y Cemento Asfáltico **72**
Producción de Mezcla Reciclada **75**
Carga en Camión o Silos **77** Control de Emisiones **78**
Calibración **78**
Sumario **79**

9 PLANTAS DE MEZCLA EN TAMBOR DE FLUJO PARALELO **80**
Entrada de Agregados **80**
Sistema de Quemador **80**
Proceso de Transferencia de Calor **82**
Inyección de Cemento Asfáltico **85**
Sistema de Alimentación de Relleno Mineral y Colector de Polvo **86**
Sistemas de Reciclaje de Pavimento Asfáltico Recuperado **88**
Tasas de Producción **89**
Eficiencia de la Planta **91**
Sumario **92**

10 PLANTAS DE MEZCLA EN TAMBOR DE FLUJO CONTRAPUESTO **93**
Entrada, Calentamiento y Secado de Agregados **93**
Unidad de Mezcla **94**
Sumario **95**

11 SILOS DE ACUMULACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TÉCNICAS DE CARGA **96**
Tipos de Silos y Diseños de Silos **96**
Entrega de Mezcla **98**
Carga de Camiones desde los Silos **100**
Sumario **103**

12 CONTROL DE EMISIONES **105**
Colector Seco **105**
Colector Húmedo **106**
Colector de Polvo (Baghouse) **108**
Polvo Fugaz **112**
Sumario **112**

PARTE III Colocación y Compactación de Mezcla Asfáltica en Caliente

13 ENTREGA DE LA MEZCLA **115**
Descarga de la Mezcla **115**
Procedimientos de Transporte **118**
Resumen **120**

14 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE **122**
Preparación de la Base para Nuevos Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA) **122**
Preparación de Superficies Existentes para Capas Superficiales de Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA) **123**
Resumen **128**

15 COLOCACIÓN DE LA MEZCLA **130**
Unidad de Tractor **130**
Unidad de Extensión **137**
Resumen **150**

16 CONTROL AUTOMÁTICO DE EXTENSIÓN: **152**
Control Manual Versus Automático de Pavimentación **152**
Control de Gradiente **154**
Control de Pendiente **159**
Rendimiento, Espesor Mínimo y Controles de Pavimento **160**
Resumen **161**

17 CONSTRUCCIÓN DE JUNTAS **162**
Juntas Transversales **162**
Juntas Longitudinales **168**
Resumen **174**

18 COMPACTACIÓN **175**
Definiciones **175**
Factores que Afectan a la Compactación **175**
Variables de Compactación Bajo Control del Operador **185**
Determinación del Patrón de Balanceo **188**
Resumen **192**

19 PROBLEMAS EN LA CAPA SUPERIOR **194**
Ondas Superficiales **194**
Desgarros (Vetas) **196**
Textura No Uniforme **197**
Marcas del Pavimento **198**
Respuesta del Pavimento **199**
Sombras de Superficie (Helicoide) **200**
Mala Precompactación **200**
Problemas en las Juntas **201**
Grietas **202**
Empuje y Surcos **205**
Sangrado y Manchas **206**
Marcas de Rodillo **208**

Segregación **209**
Mala Compactación de la Mezcla **211**
Otros Problemas en el Pavimento **212**

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS **213**

BIBLIOGRAFÍA **214**

PART E I

Organización del Proyecto, Diseño de la Mezcla y Control de Calidad

1 Introducción

PROPÓSITO Y ORGANIZACIÓN DEL MANUAL

El propósito del *Manual de Pavimentación con Asfalto en Caliente* es describir la producción y colocación de mezclas asfálticas desde un enfoque práctico. Este manual está dirigido a quienes participan en la construcción de pavimentos asfálticos y comprende dos grupos clave interesados en garantizar alta calidad en pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (HMA). El primer grupo incluye personal de agencias como ingenieros residentes, de condado, municipales, de proyecto e inspectores de planta o pavimentación. Aquí, "agencia" se refiere al propietario gubernamental u otra entidad responsable del proyecto. El segundo grupo abarca empleados de contratistas, como superintendentes de proyecto, planta o pavimentación, y capataces de planta o pavimentación. El enfoque del manual son las prácticas en campo, tanto en la planta asfáltica durante la producción como en el sitio de pavimentación en el extendido y compactación.

Después de esta introducción, la Parte I inicia con una revisión breve sobre la organización del proyecto (Sección 2). Luego, se analiza el papel del diseño de mezcla en el comportamiento durante la fabricación, colocación y compactación (Sección 3), incluyendo las especificaciones y requisitos de los aglutinantes y mezclas Superpave®. Se resalta la importancia del control de calidad del contratista y la garantía de calidad de la agencia responsable del control del proyecto, junto con las diferencias entre especificaciones de tipo de método y tipo de resultado final (Sección 4).

La **Parte II** sigue el orden de las operaciones de la planta HMA. Primero, se presenta un panorama general de los tipos de plantas de asfalto (Sección 5). Luego, se revisan el almacenamiento y manejo de agregados (Sección 6) y el sistema de suministro de cemento asfáltico (Sección 7). Después, se discuten las operaciones de mezcla en tres tipos de plantas: de lote, flujo paralelo y contraflujo (Secciones 8, 9 y 10). Por último, se abordan los silos de almacenamiento y regulación (Sección 11) y el control de emisiones (Sección 12). Cada sección de la Parte II concluye con los factores operativos clave.

La **Parte III** analiza las operaciones para colocar la mezcla asfáltica en el sitio de extendido. Primero, se describe la entrega de la mezcla a la pavimentadora (Sección 13). Las secciones siguientes abordan, la preparación de la superficie (Sección 14), colocación de la mezcla (Sección 15), control automático de la regla (Sección 16), construcción de juntas (Sección 17), compactación (Sección 18) y problemas del manto asfáltico (Sección 19). Como en la Parte II, cada sección finaliza con un resumen de los factores operativos clave a supervisar en cada área.

Definición de mezcla asfáltica en caliente

El término "mezcla asfáltica en caliente" se refiere a varios tipos de mezclas de agregados y cemento asfáltico, que se producen en altas temperaturas en una planta de asfalto. Por lo general, la HMA se clasifica en tres tipos principales de mezcla: granulometría densa, granulometría abierta y granulometría discontinua, según la gradación del agregado empleado (ver Tabla 1-1). La HMA de granulometría densa incluye mezclas continuamente gradadas, mezclas con piedra grande y mezclas de arena-asfalto. La granulometría abierta abarca capas de fricción abierta y bases permeables tratadas con asfalto. La granulometría discontinua incluye mezclas de asfalto con gradación discontinua y mezclas de asfalto tipo matriz de piedra. Gradaciones representativas se ilustran en la Figura 1-1. Los diseñadores de pavimentos especifican diferentes tipos de mezcla para cumplir con requisitos de desempeño específicos y adaptarse a la variabilidad en disponibilidad, costos de agregados y cemento asfáltico.

Mezcla asfáltica en caliente densa gradada

La HMA densa gradada está compuesta por un aglutinante de cemento asfáltico con agregados de gradación continua.

La *HMA convencional* consite en mezclas con agregados con un tamaño máximo nominal entre 12.5 mm (0.5 in) a 19 mm (0.75 in). Este material representa la mayoría de las mezclas asfálticas en caliente empleadas en los Estados Unidos.

TABLA 1-1 Tipo de Mezclas Asfálticas en Caliente

Densa gradada	Abierta gradada	Gradada discontinua
Convencional Tamaño máximo nominal del agregado usualmente de 12.5 a 19 mm (0.5 a 0.75 in.)	Capa de fricción porosa	Gradación discontinua convencional
Agregado de piedra grande Tamaño máximo nominal del agregado generalmente entre 25 y 37.5 mm (1 y 1.5 in.)	Base permeable tratada con asfalto	Asfalto con matriz de piedra (SMA)
Asfalto de arena Tamaño máximo nominal del agregado menor a 9.5 mm (0.375 in.)		

Las *mezclas con agregado grueso* contienen un agregado con tamaño máximo nominal superior a 25 mm (1 in). Como se observa en la Figura 1-1a, estas mezclas tienen mayor porcentaje de agregado grueso en comparación con las mezclas convencionales [mayor al tamiz 4.75 mm (No. 4)]. Durante la producción en planta, estas mezclas pueden causar mayor desgaste en el secador de plantas de lote y en los tambores de mezcla de flujo paralelo o contraflujo debido al uso de agregado más grande. También se puede experimentar desgaste adicional en el transportador de listones y los sinfines de la pavimentadora. Por el tamaño del agregado, es necesario controlar el esfuerzo de compactación aplicado a la mezcla para evitar fracturas excesivas de las partículas más grandes durante este proceso.

El *asfalto de arena* (o asfalto laminado) utiliza agregados que pasan el tamiz 9.5 mm (0.375 in) (ver Figura 1-1a). Su contenido de aglutinante es mayor que el de HMA convencional debido al aumento de vacíos en el agregado mineral. Si no se emplea arena manufacturada o arena natural de textura rugosa, la resistencia al ahuellamiento de esta mezcla suele ser baja. Puede producirse en plantas de lote o de mezcla continua sin cambios significativos en la operación. El transporte y colocación se realizan de manera estándar. No obstante, bajo equipos de compactación, esta mezcla puede desplazarse o presentar fisuras al usar rodillos de acero, especialmente en capas gruesas [mayor que 50 mm (2 in)].

Mezclas gradadas abiertas

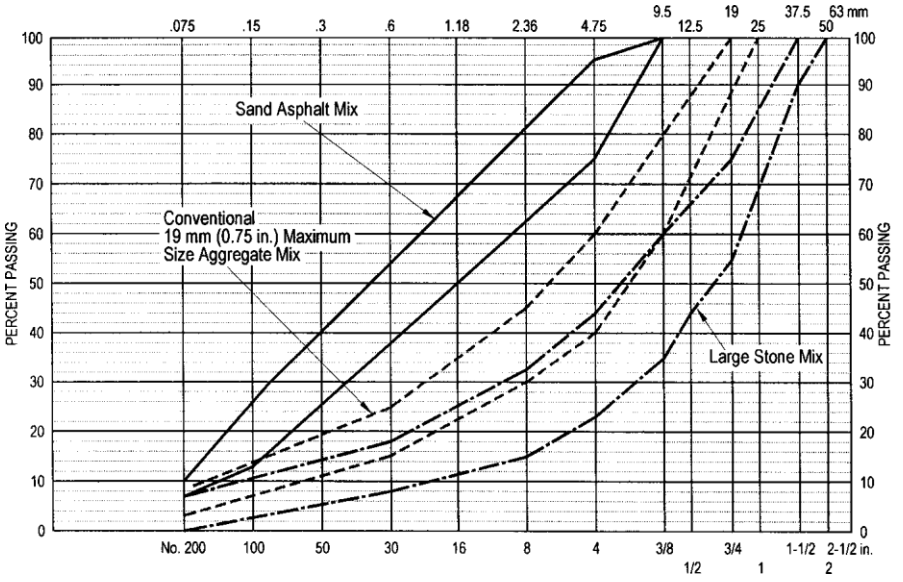
Las mezclas de granulometría abierta consisten en un agregado de gradación relativamente uniforme y cemento asfáltico o ligante modificado (ver Figura 1-1b). Su propósito principal es funcionar como capa drenante, en la superficie del pavimento o dentro de la sección estructural del pavimento.

Como se indicó, existen dos tipos de mezclas de granulometría abierta. El primero se utiliza como capa superficial para proporcionar una superficie drenante, evitando el hidroplaneo, reduciendo las salpicaduras y ruido de neumáticos; este tipo se denomina capa de fricción abierta. El segundo tipo, conocido como base permeable tratada con asfalto, está compuesto por un agregado uniformemente gradado con un tamaño máximo nominal mayor al de la capa de fricción abierta (19 mm [0.75 in] a 25 mm [1.0 in]) y se utiliza para drenar el agua que entra en la sección estructural del pavimento desde la superficie o subsuelo.

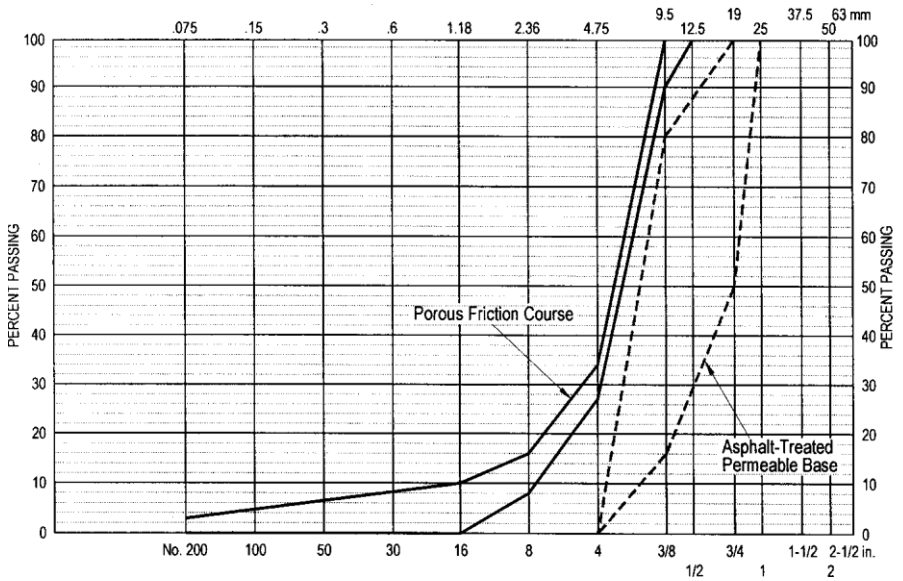
La producción de mezclas de granulometría abierta es similar a la de granulometría densa, con la principal diferencia en la temperatura de mezcla. Se utilizan temperaturas más bajas para evitar drenaje durante el almacenamiento temporal en un silo de acumulación y durante la entrega al pavimentador. Recientemente, se han añadido polímeros y fibras en las capas de fricción abierta para reducir el drenaje y mejorar la durabilidad de las mezclas. La colocación de la mezcla es generalmente convencional, y requiere menos esfuerzo de compactación en comparación con las mezclas de granulometría densa.

Mezclas gradadas discontinuas

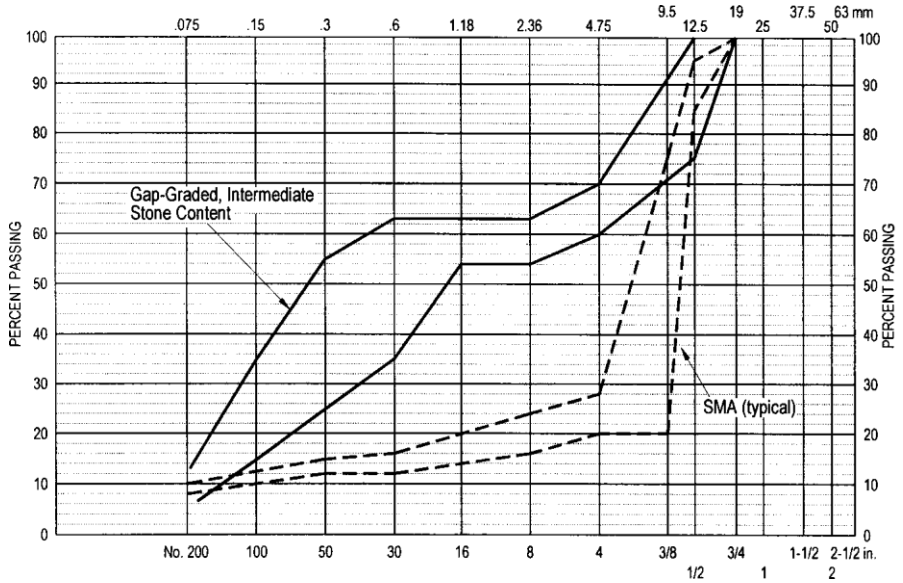
Las mezclas de granulometría discontinua funcionan de manera similar a las mezclas de granulometría densa, proporcionando capas densas e impermeables cuando se compactan adecuadamente. Las mezclas convencionales gradadas discontinuas se han utilizado durante muchos años. Sus agregados varían desde gruesos hasta finos, con algunos tamaños intermedios ausentes o presentes en cantidades pequeñas; una gradación representativa de este tipo de mezcla se muestra en la Figura 1-1c. El segundo tipo de mezcla de granulometría discontinua es la mezcla de asfalto con matriz de piedra (SMA), cuya gradación representativa también se muestra en la Figura 1-1c. La producción



a. Dense-graded



b. Open-graded



c. Gap-graded

FIGURA 1-1 Gradaciones representativas de agregados.

de la mezcla HMA requiere la adición de una cantidad significativa de relleno mineral al agregado normal para lograr el 8 a 10 por ciento que pase a través del tamiz de 0,075 mm (No. 200). Debido a la gran cantidad de relleno mineral necesario, generalmente se requiere un sistema de entrega separado para suministrar el relleno a la planta. Además, es necesario evitar que el material de relleno se convierta en partículas suspendidas en el aire dentro del secador o tambor de mezcla, y que sea expulsado de la planta hacia los equipos de control de emisiones. Al igual que en las mezclas de gradación abierta, es fundamental controlar cuidadosamente la temperatura de descarga de la mezcla en la planta para prevenir el drenaje del ligante durante el almacenamiento temporal de la mezcla en el silo y durante el transporte al sitio de la obra. Normalmente se utilizan fibras, polímeros o ambos en la mezcla SMA para evitar el drenaje del ligante.

MANO DE OBRA

Varios factores importantes de construcción afectan directamente el rendimiento final de una pavimentación de HMA (mezcla asfáltica en caliente): el diseño estructural de las capas de pavimento; el diseño de la mezcla asfáltica-agregado; los procedimientos de construcción utilizados para producir, colocar y compactar la mezcla; y la mano de obra o calidad de la construcción. Una mala mano de obra puede ser uno de los factores más significativos que conduce al deterioro prematuro de un pavimento asfáltico.

Las causas de una mala mano de obra incluyen con frecuencia la ignorancia de o el incumplimiento de las especificaciones, las técnicas adecuadas de construcción y el manejo adecuado de los equipos. La capacitación adecuada del personal de construcción es clave para lograr una buena mano de obra. El personal de la planta de mezcla y del tren de pavimentación debe entender los procesos y procedimientos, así como las consecuencias de no observar las prácticas correctas para producir y colocar adecuadamente el HMA. Por ejemplo, la falta de observación por parte de los operadores de rodillos de los procedimientos adecuados de espaciamiento durante la compactación podría resultar en el desarrollo prematuro de surcos en el pavimento.

Las decisiones de gestión de proyectos también pueden llevar a una mala mano de obra. Por ejemplo, si se permite que la pavimentación continúe durante condiciones climáticas adversas, puede resultar una compactación inadecuada a pesar de que los operadores de equipos sigan las prácticas correctas. De manera similar, si la operación de pavimentación avanza demasiado rápido, puede superar la tasa de entrega del material; el resultado es la detención frecuente del tren de pavimentación, lo que a su vez puede causar rugosidad innecesaria en el pavimento.

Este manual no aborda directamente la mano de obra, pero está implícita en todas las discusiones que siguen. El desempeño adecuado de todas las tareas relacionadas con la construcción, incluyendo las pruebas y la inspección, garantiza que el HMA producido, colocado y compactado funcionará como se espera. Los procedimientos de control de calidad y aseguramiento de calidad, como los descritos en la Sección 4 de este manual, identificarán casos de mala mano de obra, pero no sus causas y solo después de que ocurran. No existe sustituto para la adherencia cuidadosa a las mejores prácticas por parte de todos los involucrados en el pavimentación con HMA.

SECCIÓN

2 Organización del Proyecto

La parte más esencial de la planificación y organización del proyecto es la comunicación. Una comunicación efectiva es vital para todos los elementos de la organización del proyecto que se revisan en esta sección:

- Los documentos del proyecto son instrucciones escritas que deben describir los requisitos de manera clara y detallada.
- La conferencia previa a la construcción inicia la comunicación verbal entre los representantes de la agencia y el personal del contratista; establece el tono tanto para la relación laboral como para las comunicaciones directas durante la ejecución del proyecto.
- La comunicación continua entre el contratista y la agencia es esencial para realizar un trabajo de alta calidad.
- Los registros del proyecto permiten rastrear eventos en caso de que sea necesario hacerlo.
- La seguridad en el trabajo no se puede mantener si la comunicación entre todas las partes es inadecuada.

DOCUMENTOS DEL PROYECTO

Los documentos del proyecto ilustran y describen el trabajo que se debe realizar según el contrato. Las definiciones específicas de estos documentos y otros términos que aplican directamente a un proyecto suelen incluirse en la primera sección de las especificaciones estándar aplicables. Los documentos del proyecto incluyen lo siguiente:

- *Planos*—Dibujos que muestran la ubicación, características, dimensiones y detalles del trabajo a realizar.
- *Especificaciones Estándar*—Instrucciones, disposiciones y requisitos para realizar el trabajo ilustrado y descrito en los planos. Los elementos en las especificaciones estándar están relacionados con o ilustran el método y la manera de ejecutar el trabajo, o describen las cualidades y cantidades de los materiales y la mano de obra que deben proporcionarse según el contrato.
- *Especificaciones Especiales o Suplementarias*—Adiciones y revisiones aprobadas a las especificaciones estándar.
- *Disposiciones Especiales*— Adiciones o revisiones a las especificaciones estándar o suplementarias que son aplicables solo a un proyecto individual.

A menudo, una serie de otros documentos son incorporados por referencia en las especificaciones estándar, especificaciones suplementarias y disposiciones especiales. Las especificaciones de materiales y los procedimientos de prueba de la Asociación Americana de funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales (AASHTO) y ASTM a menudo se incluyen en las especificaciones y se convierten en parte de los documentos del contrato, como si el texto completo estuviera incluido. Documentos adicionales, como el Manual de Dispositivos Uniformes de Control de Tráfico y las regulaciones de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), se tratan de la misma manera cuando se mencionan en las especificaciones.

Muchas de las especificaciones de materiales y métodos de prueba redactados por AASHTO o ASTM para su uso a nivel nacional son modificados para su uso bajo condiciones locales. Las agencias gubernamentales a menudo publican sus propias especificaciones de materiales y métodos de prueba. Estas publicaciones generalmente se mencionan en los documentos del contrato y se convierten en parte de esos documentos. Los manuales de inspección o las pautas normalmente están destinados al uso de los representantes de la agencia y no forman parte de los documentos del contrato.

Si existe una discrepancia entre las instrucciones y especificaciones en cualquiera de los documentos del contrato, hay una jerarquía definida entre los tipos principales de documentos mencionados. El orden de prioridad, de mayor a menor, suele ser disposiciones especiales, planos, especificaciones especiales o suplementarias y especificaciones estándar. Este orden de prioridad corresponde a la aplicabilidad específica de los documentos a un proyecto o contrato.

Los planos y especificaciones deben ser precisos y completos, y deben dejar poco espacio para suposiciones o reinterpretaciones posteriores. Además, los planos y especificaciones deben definir las responsabilidades tanto la agencia como el contratista deben asegurarse de que las especificaciones incluyan el tipo y la frecuencia de inspecciones y pruebas. Las especificaciones CC/AC deben detallar cómo el contratista supervisará su trabajo y cómo la agencia realizará las pruebas de aceptación. Documentos contractuales claros reducen discusiones posteriores.

Con especificaciones de garantía, el contratista realiza y controla las pruebas del producto según las pautas generales establecidas por la agencia.

CONFERENCIA PREVIA A LA CONSTRUCCIÓN

A menudo se realiza una conferencia previa a la construcción antes de que comience el trabajo en un proyecto. Durante esta reunión, se establece el tono general—preferentemente uno de cooperación—para el trabajo. Los representantes de la agencia son generalmente responsables de describir el alcance del proyecto y discutir la información proporcionada en los documentos del contrato. También son responsables de tratar cualquier aspecto inusual del trabajo, es decir, aquellos que no son prácticas rutinarias de construcción. Debe proporcionarse al contratista una lista del personal de la agencia que será asignado al proyecto.

Las personas que representen al contratista deben estar familiarizadas con todos los aspectos del trabajo y ser capaces de hablar con autoridad sobre lo que se debe lograr. Se debe presentar un cronograma de progreso para el trabajo y discutirlo con los representantes de la agencia. Cualquier duda sobre los datos e información en los documentos del contrato debe plantearse y solicitar aclaración, si es necesario. Se debe proporcionar una lista del personal clave del contratista que será asignado al proyecto, con líneas claras de autoridad delineadas. Esta lista debe incluir a los suplentes para el personal clave que puede no estar disponible cuando se necesite.

En la conferencia previa a la construcción, no debe asumirse que todos comprenden o están de acuerdo con el cronograma. Es esencial acordar métodos para completar el proyecto a tiempo, minimizando retrasos y órdenes de cambio. La continuidad en las operaciones de pavimentación asfáltica, clave para la calidad, debe discutirse, abordando fuentes de materiales, producción, transporte, anchos, velocidad de pavimentado y equipo de compactación. Además, se deben definir tareas, autoridad y responsabilidades de cada participante. Si es posible, el contratista debe proporcionar una lista del equipo que usará.

Los métodos de muestreo y las frecuencias deben ser discutidos. Los métodos deben ser revisados para asegurarse de que todos los involucrados entiendan el propósito de cada prueba, ubicación, las personas que deben realizarla, el plazo de devolución y comunicación de los resultados de las pruebas, y los procedimientos a seguir si se obtienen resultados de pruebas fallidas. Si no se cubre adecuadamente en las especificaciones, debe considerarse el uso de muestras duplicadas o divididas (una para ser aprobada por el contratista y otra para ser aprobada por la agencia), así como los procedimientos para volver a probar materiales inadecuados o para pruebas por un tercero. Los detalles del programa de control de calidad tanto con el contratista como con la agencia deben ser discutidos para que todos estén al tanto de "quién, qué, por qué, cuándo y cómo."

Uno de los temas más importantes a tratar en la conferencia previa a la construcción es la seguridad en el trabajo (como se discutirá más adelante). La seguridad es una responsabilidad legal y financiera de todos los involucrados en el proyecto, y también una responsabilidad moral. La discusión de este tema debe incluir no solo la seguridad de aquellos que trabajan en el proyecto (tanto personal del contratista como de la agencia), sino también la seguridad del público que transita por la zona. La responsabilidad del mantenimiento de dispositivos de control de tráfico, como señales, marcas viales y banderilleros, debe delinearse. El nombre del contratista responsable de seguridad debe proporcionarse a la agencia para facilitar comunicaciones rápidas y claras ante problemas. Todo el personal debe cumplir con las normas de seguridad aplicables al tipo de construcción y pavimentación asfáltica.

COMUNICACIÓN CONTINUA

La comunicación no puede detenerse una vez que ha concluido la conferencia previa a la construcción. La calidad del trabajo realizado y la seguridad de quienes realizan e inspeccionan la construcción están directamente relacionadas con la calidad de la comunicación entre la agencia y el contratista. Es importante que las personas encargadas del proyecto a diario, tanto de la agencia como el contratista, se reúnan periódicamente, tanto de manera formal como informal, para discutir el progreso y la calidad del trabajo realizado hasta la fecha y el cronograma para trabajos futuros.

Reuniones Formales

La frecuencia de las reuniones formales depende del alcance y del tamaño del trabajo de pavimentación. En un proyecto importante, las reuniones de actualización deberían llevarse a cabo al menos dos veces por semana.

El personal clave de la agencia y del contratista deben estar presente en estas reuniones. La discusión debe incluir temas como el trabajo completado y los resultados de pruebas. La reunión también se enfoca en lo que aún no se ha completado y las fechas de las próximas semanas. Se tiene que discutir los cambios que hacer en el proceso del trabajo, así mismo los cambios en el personal, el equipamiento, los métodos de construcción usados y el diseño de la mezcla. Se debe comunicar y explorar soluciones a los problemas que surgen y también a los anticipados.

Si se necesita reuniones formales, se deben llevar a cabo con regularidad, como cada Lunes a las 8:00 a.m. por la mañana en la oficina del Proyecto. La reunión debe ser dirigida en conjunto, por la agencia y contratista, y se debe usar como un foro para aportar positivamente al proyecto. Se tiene que preparar una lista de pendientes individuales, que contenga los minutos para la reunión. Estos minutos deben ser completados y distribuidos para todo, tan rápido como sea posible.

Reuniones informales

Las reuniones informales, realizadas diariamente entre la agencia y el contratista, deben programarse regularmente, idealmente en el sitio de trabajo. Su propósito es doble: resolver eventos del día anterior, como avances y problemas, y planificar los próximos días, actualizando la información de la última reunión formal.

Los proyectos de pavimentación asfáltica, como muchos proyectos de construcción, no siempre se desarrollan según el cronograma original. Pueden surgir cambios debido a problemas con el suministro de materiales, fallas en el equipo, horarios del contratista y subcontratistas, o condiciones climáticas. Cuando ocurren estos cambios, es importante que sean comunicados entre el contratista y la agencia. La comunicación es un proceso bidireccional, y las reuniones informales diarias ofrecen un foro para el intercambio de esta información.

Formas de comunicación

La comunicación debe ser tanto oral como escrita. Gran parte de la información puede ser transmitida de forma oral, pero la discusión de información importante debe ser seguida de una confirmación por escrito. En algunos casos, especialmente cuando las condiciones del proyecto cambian sustancialmente, deben redactarse cartas formales tanto por parte del contratista como de la agencia. Sin embargo, con frecuencia, una nota informal puede ser escrita para confirmar la información ya comunicada de forma oral.

Además, el personal tanto de la agencia como del contratista debe llevar un registro diario de los eventos que ocurran. Si un suceso es lo suficientemente importante como para ser recordado más adelante, es lo suficientemente importante como para ser escrito inmediatamente después de ocurrir, de manera que la información sea precisa y completa.

REGISTROS DEL PROYECTO

Se necesitan registros precisos y completos para todos los proyectos de construcción. Esto es cierto tanto para el ingeniero del proyecto y su equipo como para el superintendente general del contratista, los superintendentes de planta y pavimentación, y todos los capataces. Intentar reconstruir eventos posteriormente sin notas escritas y datos de pruebas completos suele ser frustrante y a menudo resulta en opiniones contradictorias sobre lo que ocurrió. Debe seguirse siempre un procedimiento: si hay dudas sobre si la información es importante o útil, escríbela.

Reportes de planta

Los resultados de todas las pruebas diarias y periódicas realizadas en la planta de asfalto deben registrarse. Aunque se pueden usar diferentes formatos para este propósito, tanto el personal de inspección del proyecto como los empleados del contratista deben recopilar esencialmente el mismo tipo de información. Además, el personal del contratista debe completar y mantener sus propios registros, incluso si la agencia no lo requiere. Independientemente del formato utilizado, los datos que deben incluirse son: *(a)* número de proyecto y ubicación, *(b)* condiciones climáticas, *(c)* fuente de materiales utilizados en el proyecto, *(d)* información de la fórmula de mezcla, *(e)* datos de granulometría del agregado y contenido de asfalto, *(f)* resultados de las pruebas de la mezcla, *(g)* cantidad de cada material (agregado, cemento asfáltico y aditivos) utilizado, *(h)* número de toneladas de mezcla asfáltica producida, y *(i)* ubicación en el pavimento donde se colocó la producción diaria (ver Figura 2-1). Cualquier información adicional requerida por las especificaciones de la agencia, como el contenido de humedad de los acopios de agregado, también debe registrarse en el formato.

Es importante incluir la fecha, hora y ubicación de todas las muestras tomadas, junto con el nombre de quien las tomó. Por ejemplo, si la granulometría del agregado se determina a partir de muestras tomadas en diferentes ubicaciones (como en la banda de alimentación en frío y en la mezcla extraída), esas ubicaciones deben especificarse en el informe. Asimismo, si el contenido de asfalto se mide habitualmente con un medidor nuclear y ocasionalmente se verifica por extracción, el

HMA Plant QC Report

Date: _____ Test Report No: _____ Project: _____ Time:_____ Lot No: _____
Sublot No: _____ Location Mix Placed: _____ Sample Location (truck, paver, in-place): _____

Asphalt Cement

Grade _____ Source _____ Design Content _____ Measured Content _____

Test Method _____

Aggregate

Source of Aggregate (stockpiles, cold feed, extraction, ignition): _____

Washed or dry gradation? _____

Sieve Size	JMF Percent Passing	Measured Percent Passing
37.5 mm		
25 mm		
19 mm		
12.5 mm		
9.5 mm		
4.75 mm		
2.36 mm		
1.18 mm		
0.6 mm		
0.3 mm		
0.15 mm		
0.075 mm		

Aggregate	Source	% Used
1		
2		
3		
4		
5		

Fine Aggregate Angularity: _____

Coarse Aggregate Angularity: _____

Percent Flat & Elongated (5 to 1): _____

Mix Testing

No. of gyrations @ Nd: _____ Laboratory Compaction Temp: _____ Bulk Specific Gravity: _____

Voids @Nd: _____ Voids filled @ Nd: _____ VMA @ Nd: _____

% Gmm @ Ni: _____ % Gmm @ Nd: _____ % Gmm @ Nmax: _____

Maximum Theoretical Specific Gravity: _____ Retained Tensile Strength (percent): _____

Sample obtained and tested by: _____

FIGURA 2-1 Ejemplo de reporte de planta

procedimiento utilizado debe registrarse. Los resultados de pruebas no satisfactorias deben destacarse en el formato.

La mayoría de los formatos deben contar con un área de "Observaciones" para indicar cualquier evento inusual o resultados de pruebas que ocurrieran durante el día. También se deben proporcionar comentarios sobre posibles causas de resultados no satisfactorios y las acciones correctivas o cambios realizados, así como sus resultados.

Informe de compactación en campo

Debe registrarse toda la información sobre las operaciones de colocación y compactación de la mezcla en el sitio de pavimentación. Aunque el formato de esta información puede variar entre el inspector de pavimentación y el superintendente del contratista, ambos deben reportar esencialmente los mismos datos. Esta consistencia permite discusiones más significativas en caso de que surjan deficiencias en los resultados de

las pruebas o en el desempeño de la mezcla bajo el tráfico. Los datos en el informe de compactación en campo suelen incluir: *(a)* número de proyecto y ubicación, *(b)* tipo y cantidad de toneladas de cada mezcla colocada y su ubicación exacta (número de capa, espesor, carril y estación), *(c)* ubicación de las pruebas realizadas (tanto transversal como longitudinalmente), y *(d)* resultados de densidad obtenidos. También se debe registrar otra información del proyecto, como: *(a)* condiciones climáticas, *(b)* tipo y modelo del equipo de compactación utilizado por el contratista, *(c)* tipo, cantidad y ubicación del material de imprimación colocado, *(d)* total acumulado de toneladas de cada mezcla colocada en el proyecto, y *(e)* resultados de la lisura obtenidos.

Todas las muestras tomadas deben identificarse claramente, indicando la ubicación, fecha, hora, motivo, cantidad representada y el nombre de quien las tomó. Si se utilizó un medidor nuclear para determinar la densidad relativa de la mezcla, se deben registrar los procedimientos de calibración realizados para verificar su fiabilidad. Los resultados de pruebas no satisfactorias deben destacarse.

El área de "Observaciones" en el formato debe utilizarse para registrar condiciones inusuales o resultados de pruebas del día, y, si es posible, explicar los resultados no satisfactorios y los pasos tomados para corregir el problema deben registrarse, junto con sus resultados.

MARYLAND
STATE HIGHWAY ADMINISTRATION
OFFICE OF MATERIALS & RESEARCH

QC: ___
Acceptance: ___
I.A.S.T.: ___
Other: ___

HMA FIELD COMPACTION REPORT - CORE METHOD

Date Sampled: _____ Contract No: _____ F.A.P. No: _____ Plant Location: _____

Mix Design No: _____ Depth: _____ Laid Over: _____ Cut By: _____

Lot Size: _____ Lot No: _____ Mix Lot No: _____ Mix Sublot No: _____

Witnessed By: _____ Tested By: _____

CORE SAMPLE NUMBER	DATE & TIME TONNAGE LAID	LOCATION (Indicate Station Number per MSMT 418)	THICKNESS	MAXIMUM GRAVITY WEIGHT - GRAMS in Air	in Water	SSD in Air	VOLUME in cc	BULK SPECIFIC GRAVITY	% DENSITY	SUBLOT AVERAGE % DENSITY	PWSL =
											PAY FACTOR =
											REMARKS:

PROJECT ENGINEER: Send first 3 copies to Plant with cores.

PLANT CONTROL TECHNICIAN: Original to QA folder
First carbon to Project
Second carbon for Plant records

CORE LOT AVERAGE _____

STANDARD DEVIATION _____

Sheet _____ of _____

FIGURA 2-2 Ejemplo de reporte de compactación en campo.

Diario

Todos los supervisores de proyectos, tanto de la agencia como del contratista, deben estar obligados a llevar un diario detallado para posibles referencias futuras. Este documento debe usarse para registrar cualquier cambio realizado en el modo de operación de la planta de asfalto o del equipo de extendido y compactación. También debe documentar cualquier evento no rutinario que ocurra en el trabajo. El diario diario también puede utilizarse para registrar otra información, como una lista de visitantes al proyecto. Asimismo, debe emplearse para anotar las razones de cualquier retraso en el pavimento (por ejemplo, una avería de equipo o malas condiciones climáticas).

Para que la información de un diario sea precisa y significativa, debe registrarse poco después de que ocurran los eventos. El diario debe actualizarse al menos dos veces al día: una vez al mediodía y nuevamente al final del día. Si las condiciones y horarios del trabajo impiden hacer la entrada al mediodía, los eventos del día siempre deben escribirse al finalizar las actividades de cada jornada.

La información contenida en el diario debe ser lo más detallada y completa posible. Si se realiza una conversación sobre la actividad del proyecto con otro personal involucrado, ya sean inspectores de la agencia o empleados del contratista, se deben registrar la fecha y el lugar de la conversación. También se deben anotar los nombres y cargos de las personas involucradas, así como los temas tratados. Si una discusión afecta el progreso del proyecto o los resultados obtenidos en las operaciones de fabricación y colocación de la mezcla, debe indicarse su resultado: ¿Quién dijo a quién qué hacer, y cuál fue la respuesta?

La importancia de la información contenida en el diario no puede subestimarse. Muchas reclamaciones y demandas legales se han resuelto con base en dicha información. Si una de las partes en una disputa puede presentar información escrita de manera oportuna en un diario, mientras que la otra solo puede confiar en su memoria para reconstruir los eventos, quien tenga el registro escrito generalmente tendrá ventaja en la resolución del desacuerdo. Además, la información del diario puede ser útil para realizar investigaciones de seguimiento y para determinar las causas de fallas prematuras.

SEGURIDAD

Trabajar cerca de una planta de asfalto puede ser peligroso. El uso de maquinaria, las altas temperaturas, el ruido y los camiones de entrega y transporte en movimiento aumentan la posibilidad de que ocurra un accidente Si una persona no está capacitada para realizar una función específica o no presta atención a lo que sucede, puede quemarse con la mezcla caliente de asfalto, ser rociada con cemento asfáltico caliente, atraparse una mano en una máquina o ser atropellada por un vehículo en movimiento. Trabajar en un sitio de pavimentación con asfalto también implica riesgos. Aquellos que trabajan cerca de la pavimentadora (como el tomador de boletos, el operador de la tolva, el operador del reglón y los rastrilladores) corren el riesgo de ser golpeados por el tráfico que pasa o de lesionarse con el equipo utilizado en la operación de pavimentación. Además, pueden sufrir lesiones por camiones que retroceden hacia la pavimentadora o se alejan de ella, así como por equipos de compactación.

El dicho "la seguridad es responsabilidad de todos" es particularmente cierto en un proyecto de pavimentación HMA. Desde el superintendente del contratista hasta el operador de la cargadora en la planta de asfalto, pasando por el conductor del camión y el rastrillador detrás de la pavimentadora, cada persona que trabaja para el contratista debe estar continuamente consciente de la necesidad de aplicar hábitos de trabajo seguros. Del mismo modo, cada representante de la agencia, desde el ingeniero del proyecto hasta el inspector en la planta y el tomador de boletos en la pavimentadora, debe ser consciente de estas prácticas y cumplirlas. Las regulaciones de OSHA deben ser conocidas, comprendidas y seguidas por cada persona involucrada en el proyecto.

Como se mencionó antes, la comunicación es una de las claves para un entorno de trabajo seguro. Cada persona involucrada en el proyecto debe saber qué se espera de ella y cómo realizar las tareas asignadas. Por ejemplo, la capacitación adecuada en la operación de un equipo es esencial para sus operadores. Además, se necesitan sesiones de recapacitación frecuentes, ya que mientras más tiempo alguien realiza la misma tarea día tras día, es más probable que actúe por hábito e ignore lo que sucede a su alrededor.

Las charlas de seguridad son una buena manera de comenzar el día tanto para el personal del contratista como para el de la agencia. Varias organizaciones publican presentaciones breves y concisas sobre seguridad que pueden completarse en 2 o 3 minutos. Es importante recordar a las personas que trabajan en un entorno potencialmente peligroso, tanto en la planta como en el lugar de colocación del asfalto, y estas charlas diarias son una forma de satisfacer esta necesidad. Además, si se observa una práctica de trabajo insegura, se deben tomar medidas correctivas de inmediato, incluso si la operación de

pavimentación debe detenerse hasta que se corrija la práctica. Las personas más propensas a sufrir lesiones en un proyecto de pavimentación con asfalto son aquellas que son nuevas en este tipo de trabajo. Sin una capacitación previa adecuada, estas personas no comprenden completamente la diferencia entre seguir prácticas de trabajo seguras y tomar riesgos innecesarios. A menudo, los nuevos empleados, ya sea que trabajen para la agencia o el contratista, desean demostrar que son capaces de realizar las tareas asignadas. A veces, su entusiasmo por sobresalir y agradar a otros puede superar su conciencia de las prácticas de seguridad adecuadas.

Las lesiones innecesarias también ocurren entre aquellos que han trabajado en plantas y operaciones de pavimentación durante muchos años y, por lo tanto, se sienten cómodos con el equipo. En ocasiones, estas personas realizan sus tareas por hábito y suelen tomar atajos porque han sobrevivido sin lesiones durante años. La seguridad debe formar parte del día a día de estas personas tanto como lo es para aquellos nuevos en el trabajo.

Se requiere un cuidado constante y una vigilancia continua para prevenir accidentes y lesiones asociadas con la HMA. La OSHA, la Asociación Nacional de Pavimentación Asfáltica, los departamentos estatales de transporte y otras organizaciones han publicado manuales que abordan la seguridad en la planta de producción de asfalto y en las operaciones de pavimentación. Estos manuales deben estar disponibles para todo el personal de las plantas y proyectos de pavimentación, tanto de la agencia como del contratista, y su lectura debería ser obligatoria. La seguridad es responsabilidad de todos en un proyecto de construcción.

3 Diseño de Mezcla y la Fórmula de Mezcla de Trabajo

La HMA tiene dos ingredientes principales: el ligante y los agregados. El ligante asfáltico suele ser cemento asfáltico, obtenido del refinado del petróleo crudo. Los cementos asfálticos se clasifican mediante uno de tres métodos. Los dos métodos más utilizados son el sistema de clasificación por penetración y el sistema de clasificación por viscosidad. Recientemente, muchos estados y otras agencias han adoptado un sistema de clasificación por desempeño (PG) desarrollado bajo el Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (SHRP). Los agregados utilizados son típicamente una combinación de materiales gruesos y finos, con relleno mineral añadido según sea necesario. Los agregados suelen estar disponibles localmente, ya sea en bancos o en canteras. El sistema de diseño de la mezcla determina la proporción correcta de cemento asfáltico y agregados para producir una mezcla con las propiedades y características necesarias para resistir los efectos del tráfico y el medio ambiente durante muchos años. El diseño de la mezcla se realiza en el laboratorio, generalmente utilizando uno de tres métodos. Hasta finales de la década de 1990, el método más común era el método Marshall, empleado por aproximadamente el 75 % de los departamentos estatales de carreteras, así como por el Departamento de Defensa y la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos. Otro método, utilizado por muchas agencias públicas en el oeste de los Estados Unidos, es el método Hveem. A mediados de la década de 1990, los departamentos estatales de transporte comenzaron a implementar el método Superpave® (Superior Performing Asphalt Pavement), también desarrollado bajo el SHRP. En este método, las muestras se compactan con un compactador giratorio Superpave y se prueban para evaluar sus propiedades volumétricas. Se están desarrollando procedimientos mejorados de prueba y análisis para ayudar a predecir el desempeño de la HMA bajo tráfico. Los resultados de las pruebas se analizarán para estimar la resistencia de la mezcla HMA al agrietamiento por fatiga, la deformación permanente (ahuellamiento), la susceptibilidad a la humedad y las grietas térmicas a bajas temperaturas.

Para un proyecto de pavimentación asfáltica, el diseño de la mezcla es realizado por la agencia gubernamental, el contratista o un consultor, dependiendo de los requisitos especificados en el proyecto. Independientemente de quién complete la fase de diseño de la mezcla en el laboratorio, el resultado del proceso de diseño de la mezcla es una fórmula de mezcla de trabajo. La fórmula de mezcla de trabajo es el punto de partida para el contratista al producir la mezcla asfáltica para el proyecto.

En esta sección se revisan brevemente las propiedades del cemento asfáltico y de los áridos utilizados para producir una mezcla asfáltica, así como los tres métodos anteriores de diseño de mezclas. También se tratan algunas de las diferencias que pueden existir entre las mezclas producidas en laboratorio y las producidas en planta, así como las diferencias entre los valores de la fórmula de la mezcla de obra y los resultados de los ensayos en planta.

CEMENTO ASFÁLTICO: SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN Y PROPIEDADES

Sistemas de Clasificación por Penetración y Viscosidad

La penetración de un cemento asfáltico (medida de la indentación con una aguja estándar en unidades de 0.1 mm o 1.0 dmm) se determina a 25°C (77°F). Cuanto más rígido sea el asfalto (es decir, cuanto menor sea su penetración), más rígida será la mezcla que contenga el material a una temperatura determinada. Por ejemplo, a una temperatura dada, una mezcla que contenga asfalto con grado de penetración 60–70 generalmente será más rígida y puede requerir un esfuerzo de compactación algo mayor por parte de los rodillos para alcanzar la densidad deseada que una mezcla hecha con asfalto de grado de penetración 120–150.

La clasificación de los cementos asfálticos por viscosidad se define mediante una medición de viscosidad a 60°C (140°F) del material en su condición original (recibido de la refinería) o sobre un ligante considerado comparable al que ha pasado por el proceso de mezcla en caliente (denominado AR). En el sistema de clasificación AC, una mezcla que contenga un AC-20 será más rígida que una mezcla que contenga un AC-10 a la misma temperatura. De manera similar, en el sistema de clasificación AR, una mezcla que contenga un AR-4000 será más rígida que una que contenga un AR-2000 a la misma temperatura.

Sistema de Clasificación por Desempeño Superpave

Aunque los sistemas de clasificación por penetración y viscosidad han sido efectivos, se basaban en pruebas con condiciones estándar que no siempre reflejan el desempeño real. Para mejorar, SHRP desarrolló el sistema PG, que incluye pruebas relacionadas con el desempeño en campo, simulando mejor las condiciones reales de carga, temperatura y envejecimiento. Las especificaciones PG ayudan a seleccionar un ligante adecuado para prevenir agrietamiento por frío, ahuellamiento y fatiga según el clima y el tráfico del proyecto. Una diferencia clave entre las especificaciones PG y las basadas en penetración o viscosidad es el formato. En los ligantes PG, las propiedades físicas permanecen constantes, pero las temperaturas requeridas varían según el clima. Por ejemplo, el ligante PG64-22 resiste temperaturas máximas promedio de 64°C y mínimas de −22°C. Detalles del sistema están en la publicación *Superpave Series No. 1 (SP-1)*.

Características Temperatura-Viscosidad

El conocimiento de las características de temperatura-viscosidad del ligante asfáltico es crucial en la producción y colocación de los pavimentos de mezcla asfáltica en caliente HMA. A las altas temperaturas asociadas con la mezcla del ligante y el agregado en la planta de mezcla en caliente, es fundamental conocer las propiedades de flujo del ligante (medidas en términos de viscosidad) para garantizar que el material pueda ser bombeado y manejado adecuadamente en la instalación. Durante la colocación, la compactación de la mezcla caliente depende de la rigidez del ligante. A medida que el ligante se vuelve más rígido o más viscoso, se requiere un mayor esfuerzo de compactación para alcanzar una densidad específica prescrita. Por ello, en el rango de temperaturas entre 85°C (185°F) y aproximadamente 163°C (325°F), resulta útil comprender la relación entre temperatura y viscosidad.

El cambio de viscosidad por temperatura del ligante se llama susceptibilidad térmica. Un material altamente susceptible a la temperatura es aquel que presenta un cambio significativo en su viscosidad ante una pequeña variación de temperatura. Los asfaltos con misma penetración a 25°C (77°F) no necesariamente presentan la misma viscosidad a 135°C (275°F), ya que sus características de La susceptibilidad térmica del ligante pueden variar, por lo que es crucial que el contratista conozca la relación temperatura-viscosidad durante la producción y colocación de mezclas asfálticas en caliente (HMA). Esta relación también es clave para el diseño de mezclas, ya que la temperatura de compactación en laboratorio se basa en una viscosidad específica. Un ligante con alta susceptibilidad térmica endurece más rápido al enfriarse que uno con menor susceptibilidad, lo que afecta la compactación. Si las propiedades del ligante cambian durante la producción, como al usar uno de distinta procedencia, será necesario ajustar los procedimientos de compactación para alcanzar la densidad requerida.

Características y Propiedades de los Agregados

Las características de los agregados influyen en sus propiedades y, a su vez, afectan el desempeño del HMA. Estas características determinan la cantidad de ligante necesaria para un rendimiento satisfactorio y pueden impactar la construcción, especialmente la colocación del HMA. Las características del agregado analizadas en esta sección incluyen textura y forma superficial, gradación, absorción, contenido de arcilla y durabilidad. En Superpave, la angularidad del agregado grueso, la angularidad del agregado fino, el contenido de arcilla y las partículas planas y alargadas se consideran propiedades consensuadas, con criterios establecidos a nivel nacional. Los criterios para las demás propiedades del agregado son definidos por la agencia usuaria según la disponibilidad de materiales y su experiencia.

Textura Superficial y Forma

La textura superficial del agregado es el factor más importante que contribuye a su resistencia a la fricción. Esta característica también influye significativamente en la resistencia de una mezcla al ahuellamiento. Cuanto más rugosa sea la textura del agregado, mayor será la resistencia al ahuellamiento de la mezcla. Sin embargo, durante la construcción, un HMA que contenga un agregado de textura rugosa requerirá un mayor esfuerzo de compactación para alcanzar la densidad requerida en comparación con un HMA con un agregado de textura lisa. La forma del agregado también influye en la resistencia al surcamiento de la mezcla, siendo los agregados angulares ofrecen mayor resistencia al surcamiento en comparación con los redondeados, debido a su mayor rugosidad superficial y, en parte, al interbloqueo entre partículas. Sin embargo, su angularidad también requiere mayor esfuerzo de compactación para alcanzar la densidad especificada.

En el sistema Superpave, se utilizan dos pruebas para evaluar estas características: angularidad del agregado grueso y angularidad del agregado fino, con criterios más estrictos en zonas de mayor tráfico o cercanas a la superficie del pavimento. Además, se considera la relación entre las dimensiones máximas y mínimas de las partículas; una partícula se clasifica como plana y alargada si esta relación supera 5. Estas partículas tienden a fracturarse durante la manipulación, alterando el esqueleto de los agregados, por lo que se limita su proporción para evitar este problema.

Distribución del Tamaño de Partículas (Gradación)

Una de las propiedades importantes de los agregados para su uso en pavimentos es la distribución de tamaños de partículas, o gradación. Los agregados con diferentes tamaños máximos de partículas pueden tener distintos niveles de trabajabilidad. Por lo general, cuanto mayor sea el tamaño máximo del agregado en una mezcla en relación con el espesor de la capa, y cuanto mayor sea la proporción de agregado grueso en la mezcla, más difícil será compactarla. Además, si el tamaño máximo nominal del agregado supera un tercio del espesor compactado de la capa del pavimento, la textura superficial de la mezcla puede verse afectada y la densidad obtenida mediante compactación puede reducirse. Para mejorar la resistencia del HMA al ahuellamiento, se puede incrementar tanto la proporción de agregado grueso (retenido en el tamiz de 4,75 mm [No. 4]) como el tamaño máximo de partícula. Aunque el tamaño máximo de partícula es un factor relativamente menor en comparación con otras características del agregado, puede ser significativo en las propiedades del HMA cuando se produce una mezcla de piedra grande (mayor a 25 mm [1 pulgada] de tamaño máximo nominal). Esto es particularmente relevante en términos de densidad, y puede ser necesario realizar una franja de prueba de compactación en campo para determinar la densidad alcanzable en mezclas de piedra grande. La gradación se regula mediante especificaciones que definen la distribución de tamaños de las partículas, como se muestra en la Figura 1-1. Los gráficos de gradación de la Figura 1-1 presentan el método convencional para mostrar gradaciones de agregados: el gráfico con escala de potencia 0.45. La abscisa representa el tamaño de partícula en una escala elevada a la potencia 0.45, mientras que la ordenada muestra el porcentaje en peso que pasa por un tamaño específico. Este gráfico fue desarrollado por el Bureau of Public Roads (BPR) en los años 60 y se presenta en la Figura 3-1. Este gráfico refleja el trabajo de Nijboer, confirmado por el BPR, quien experimentó con gradaciones de agregados usando una ecuación en la que el porcentaje que pasa por un tamaño es igual a una constante multiplicada por ese tamaño elevado a la potencia n. Para alcanzar la densidad máxima, se determinó que n es 0.45. El gráfico de gradación en la Figura 3-1 muestra el tamaño de abertura del tamiz elevado a la potencia 0.45 en el eje horizontal, y el porcentaje que pasa en una escala aritmética en el eje vertical. La gradación de densidad máxima para un tamaño específico se representa por una línea recta desde el origen hasta el tamaño máximo de partícula seleccionado. La línea mostrada en la Figura 3-1 representa la gradación de densidad máxima para un agregado con un tamaño máximo de 25.0 mm (1.0 pulgada). Este formato de gradación se ha integrado al diseño de mezclas Superpave, sirviendo como referencia para las proporciones de agregados, aunque la línea de densidad máxima es aproximada. Para evitar confusión, el método Superpave establece definiciones específicas para el tamaño de agregado.

- Tamaño máximo: un tamaño de tamiz más grande que el tamaño máximo nominal.
- Tamaño máximo nominal: un tamaño de tamiz más grande que el primer tamiz que retenga más del 10 por ciento en peso.

En el método Superpave, la gradación del agregado se especifica añadiendo dos características al gráfico de la Figura 3-1: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control actúan como límites de especificación, mientras que la zona restringida se encuentra a lo largo de la gradación de densidad máxima. La Figura 3-2 ilustra estas características para una gradación con un tamaño máximo nominal de 19.0 mm (0.75 in.). La Figura 3-3 muestra los requisitos de gradación Superpave para un agregado con un tamaño máximo de 25.0 mm (1.0 in.) e ilustra una gradación de agregado que cumple con los requisitos Superpave y pasa por debajo de la zona restringida.

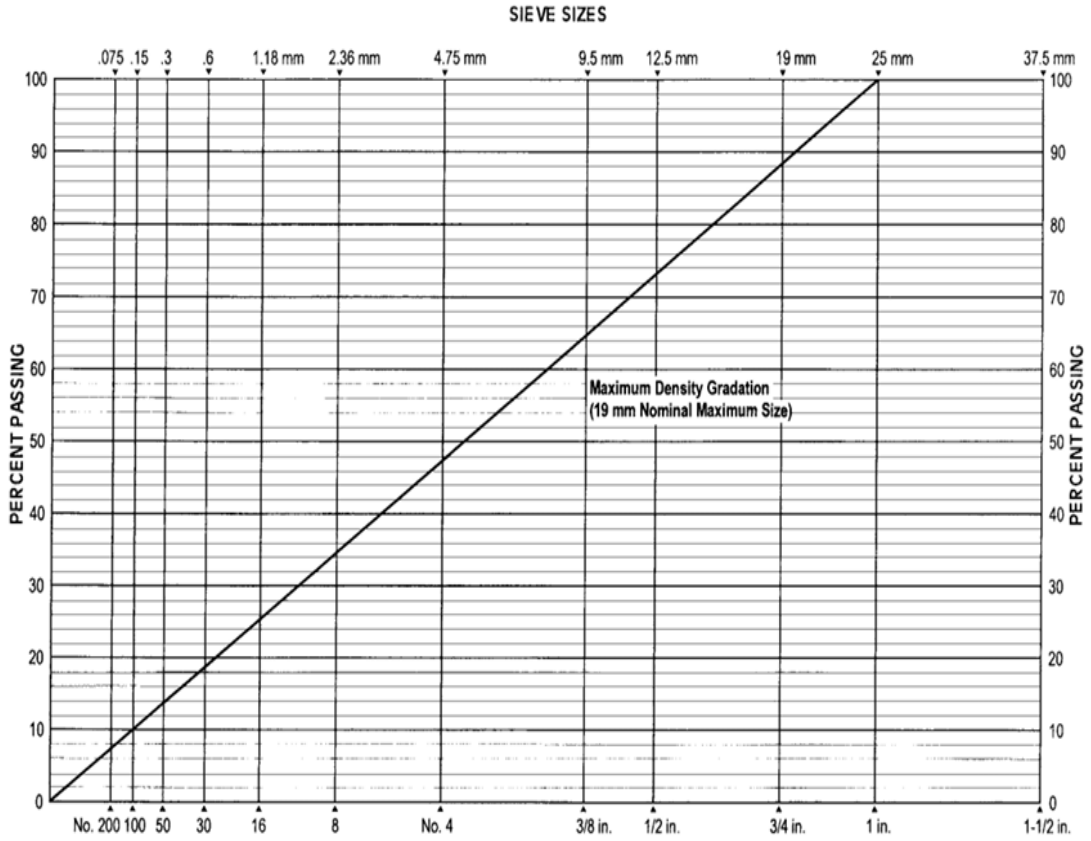


FIGURA 3-1 Gráfico de gradación, escala exponencial (n = 0.45).

La zona restringida se introdujo para asegurar que las mezclas tuvieran suficientes vacíos en el agregado mineral (VMA) y así permitir una cantidad adecuada de asfalto para garantizar la durabilidad. ya que se observó que las gradaciones que siguen la línea de densidad máxima pueden, en algunos casos, tener un VMA inferior al deseado. Un VMA bajo resulta en un espacio vacío muy pequeño para desarrollar películas de asfalto lo suficientemente gruesas para una mezcla duradera. La zona restringida también busca limitar la cantidad de arena natural en la mezcla, ya que los agregados con exceso de arena natural producen mezclas de HMA tiernas. Algunas gradaciones que atraviesan la zona restringida ofrecen mezclas de buen rendimiento, pero se recomienda evitar las gradaciones como las de la Figura 3-4. con pendientes pronunciadas a través de la zona restringida, para no producir mezclas tiernas y difíciles de compactar (3). La Figura 3-5 ilustra los componentes de HMA y el término VMA. Las mezclas que siguen la línea de densidad máxima pueden tener un VMA menor al requerido por algunas especificaciones. Con un VMA más bajo, la mezcla puede volverse más crítica respecto al contenido de asfalto; un pequeño aumento en el contenido de asfalto por encima del valor de diseño provocara una reducción en la resistencia al surcamiento. Cuando se usan mezclas de este tipo, el control del contenido de ligante durante la construcción es extremadamente importante. El contenido de finos, material que pasa por el tamiz de 0.075 mm (No. 200), influye en la compactibilidad de la mezcla asfalto-agregado. Las mezclas con bajo contenido de finos pueden ser difíciles de compactar. Aumentar el contenido de finos aumenta la rigidez en la mezcla, permitiendo compactar con el rodillo, en lugar de "desplazarse". Demasiado material en este rango de tamaño podría afectar la compactibilidad de la mezcla. El método Superpave establece un límite en la proporción de polvo, que es la relación entre el porcentaje que pasa por el tamiz de 0.075 mm (No. 200) y el contenido efectivo de asfalto (expresado como porcentaje del peso total de la mezcla).

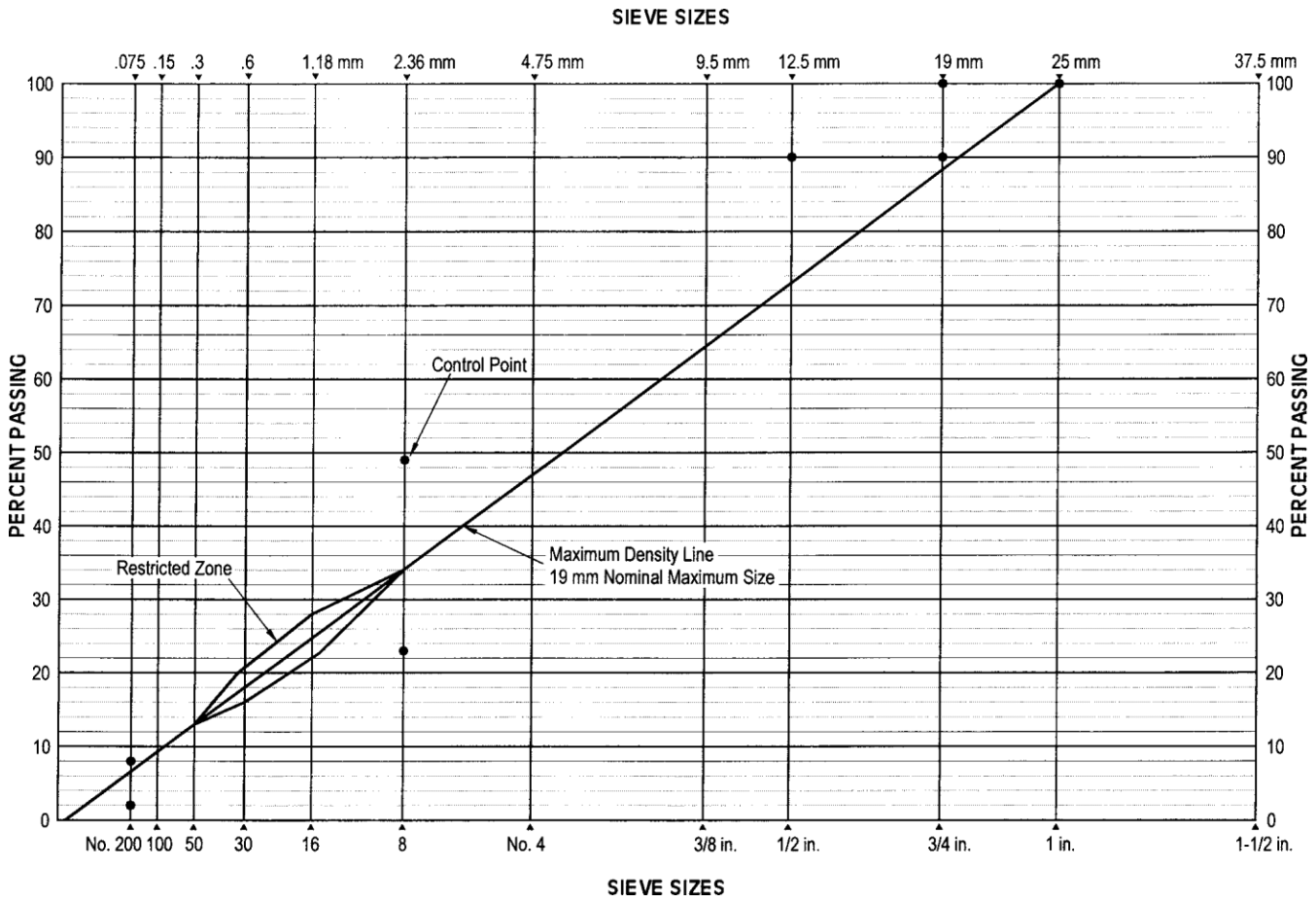


FIGURA 3-2 Puntos de control y zona restringida para la gradación de agregados con un tamaño máximo nominal de 19 mm.

La distribución de tamaño del material que pasa por el tamiz de 0.075 mm también influye en la rigidez de la mezcla de asfalto y polvo de agregado, por lo que también puede afectar la compactibilidad de la mezcla. Para un mismo asfalto, si la mayoría de las finas son más pequeñas que 0.020 mm (20 micrones), la rigidez del ligante será mayor que si la mayoría de las finas están en el rango de 0.075 a 0.020 mm. La graduación del material menor a 0.075 mm (tamiz N° 200) por sí sola no indica el efecto de endurecimiento de las finas.

Absorción

La cantidad de cemento asfáltico absorbido por el agregado puede afectar significativamente las propiedades de la mezcla asfáltica. Si las partículas del agregado tienen una alta absorción de asfalto, el contenido de asfalto en la mezcla deberá incrementarse para compensar el material de ligante que se absorbe en los poros del agregado y que no está disponible como parte del grosor de la película alrededor de esas partículas. Si no se hace ese ajuste en el contenido de asfalto, la mezcla puede quedar seca y rígida, y la cantidad de esfuerzo de compactación necesario para lograr la densidad de la mezcla deberá aumentarse, lo que hará que la mezcla tenga tendencia a desintegrarse bajo el tráfico. Si se usan agregados absorbentes que contienen una alta cantidad de agua, será necesario más tiempo en la producción de la HMA para asegurar que la humedad en los poros pueda evaporarse. De lo contrario, el asfalto puede no ser absorbido adecuadamente, lo que provocaría dificultades en la compactación.

Contenido de arcilla

La presencia de arcilla en el agregado fino [material que pasa a través del tamiz de 4.75 mm (N° 4)] puede tener un efecto perjudicial sobre la sensibilidad al agua de una mezcla de concreto asfáltico. Por ejemplo, los minerales de arcilla que recubren los agregados pueden impedir que los ligantes asfálticos se adhieran completamente a la superficie de las partículas de agregado, lo que aumenta el potencial de daño por agua en la mezcla de pavimento. El ensayo de equivalente de arena se utiliza para limitar la presencia de material arcilloso en el agregado.

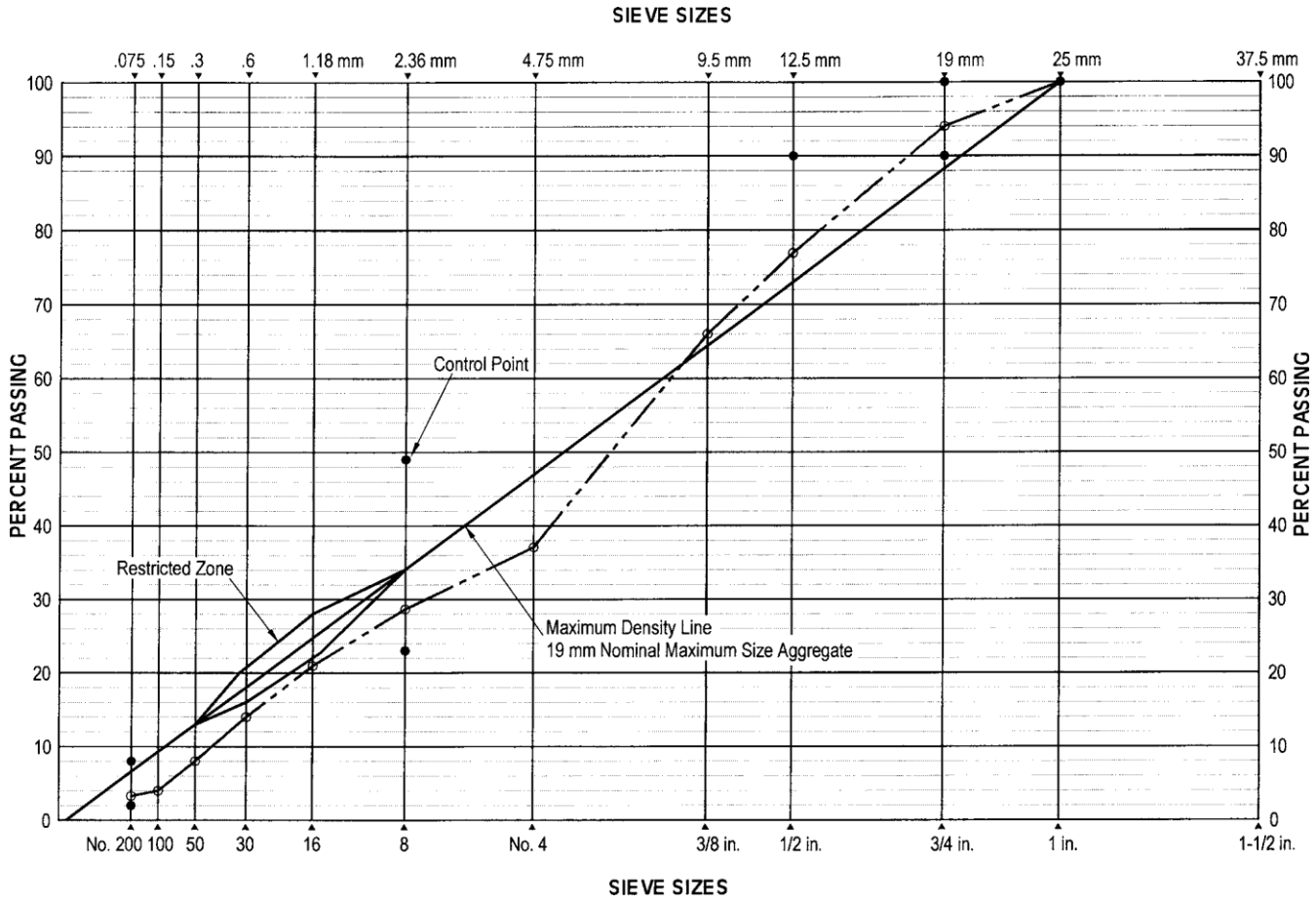


FIGURA 3-3 Clasificación de agregados que cumple con los criterios de Superpave y pasa por debajo de la zona restringida.

Factores adicionales que afectan la durabilidad

Para mitigar la degradación (producción de finos) de los agregados durante la producción y colocación de la HMA, se utiliza la prueba de abrasión de Los Ángeles. Al establecer un límite máximo de pérdida por abrasión en esta prueba, se supone que la degradación del agregado está limitada.

En áreas donde ocurren ciclos de congelación y descongelación, se utiliza la prueba de sonoridad con sodio o magnesio. Al establecer un valor máximo en términos de degradación del agregado, se mejora la resistencia de este a la descomposición debido a los ciclos de congelación y descongelación. En este sentido, cabe señalar que los límites impuestos sobre la absorción de agua de los agregados también ayudan a reducir el daño causado por los ciclos de congelación y descongelación.

PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE MEZCLA

Para producir un diseño de mezcla asfáltica, el ligante asfáltico y el agregado se mezclan en diferentes proporciones en el laboratorio. Las mezclas resultantes se evalúan utilizando un conjunto estándar de criterios para permitir la selección del contenido adecuado de ligante. El tipo y la clasificación del agregado, así como la rigidez y la cantidad del ligante asfáltico, influyen en las propiedades físicas de la mezcla. El contenido de ligante seleccionado (óptimo) se elige para garantizar un equilibrio entre la durabilidad a largo plazo de la mezcla y su resistencia al ahuellamiento (estabilidad), como se ilustra en la Figura 3-6 (*4*). Esta sección proporciona una breve introducción a cada uno de los tres procedimientos de diseño de mezcla.

Método Marshall

El método Marshall surgió de los desarrollos realizados por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (USACE, por sus siglas en inglés) para un procedimiento de diseño de mezcla para pavimentos de aeródromos durante la Segunda Guerra Mundial y modificaciones posteriores (5,6). En el momento de su publicación, el método era utilizado por el USACE para pavimentos militares de aeródromos y por la Administración Federal de Aviación para pavimentos de

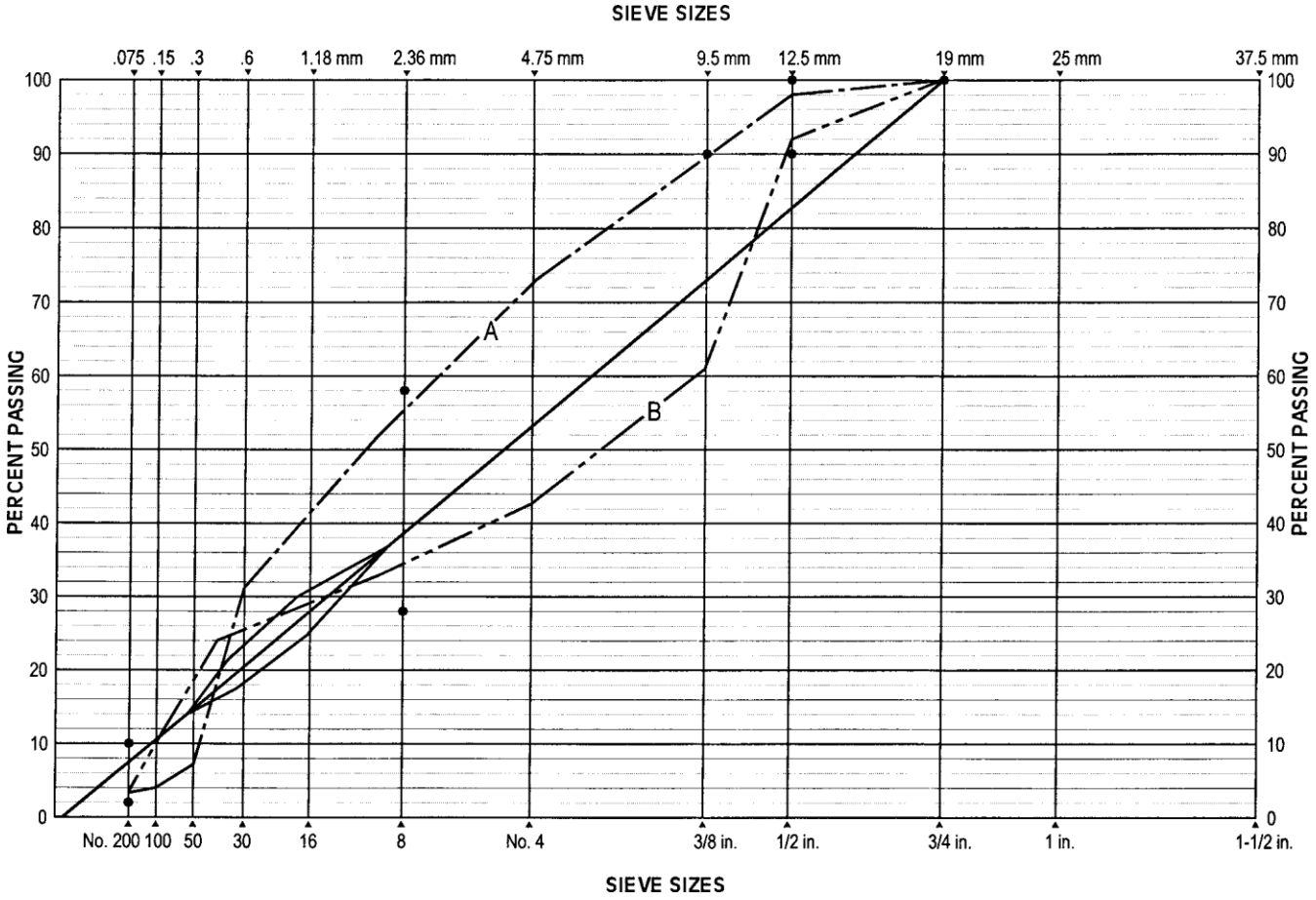
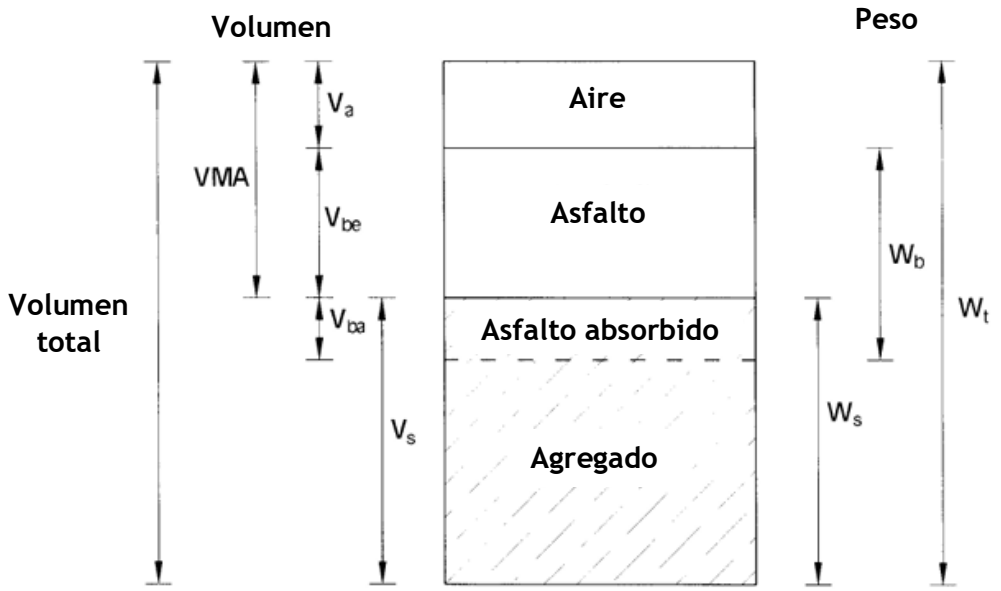


FIGURA 3-4 Ejemplos de clasificación de agregados que probablemente produzcan mezclas blandas.

de aeródromos comerciales y de aviación general. El procedimiento fue adaptado, en forma modificada, por el Instituto Asfáltico para el diseño de mezclas para pavimentos de carreteras (7), y a lo largo de la década de 1990 fue utilizado por muchas organizaciones de carreteras, tanto en los Estados Unidos como en el extranjero. Muchas organizaciones han realizado cambios menores en el método y han desarrollado sus propios criterios.

Para los pavimentos de aeródromos, las mezclas se preparan con una variedad de contenidos de ligante utilizando compactación por impacto (ASTM D1559). El esfuerzo de compactación depende de la presión de los neumáticos de los aviones que utilizan la instalación. Para los aeródromos comerciales sometidos a aviones con presiones de neumáticos del orden de 1400 kPa (200 psi), se utilizan 75 golpes del martillo de compactación por lado para compactar las muestras de prueba del laboratorio. Este esfuerzo de compactación se ha seleccionado para producir densidades representativas de las resultantes de cargas de tráfico repetidas.

El procedimiento de diseño incluye un análisis de densidad y vacíos de las muestras compactadas para determinar el porcentaje de vacíos de aire y el porcentaje de vacíos llenos con asfalto (VFA). Después de estas determinaciones, las muestras se prueban a 60°C (140°F), y se obtienen la estabilidad Marshall (carga máxima observada en la prueba) y el valor de fluidez (deformación correspondiente a la carga máxima). Los datos resultantes de estas evaluaciones de mezclas se grafican en una serie de curvas que incluyen: (*a*) densidad versus contenido de asfalto, (*b*) porcentaje de vacíos de aire versus contenido de asfalto, (*c*) porcentaje de VFA versus contenido de asfalto, (*d*) estabilidad Marshall versus contenido de asfalto, y (*e*) valor de fluidez versus contenido de asfalto. El contenido de asfalto de diseño se determina como el promedio de los cuatro contenidos seleccionados correspondientes a la máxima densidad, 4 por ciento de vacíos de aire, 75 por por ciento de VFA y máxima estabilidad Marshall. Este contenido de asfalto se verifica luego para asegurar que el contenido resultante de vacíos de aire y el porcentaje de VFA estén dentro de los límites prescritos, que la estabilidad Marshall supere el nivel mínimo especificado, y que el valor de fluidez no exceda el valor máximo prescrito.



V_a = Volumen de aire
V_{be} = Volumen de aglutinante efectivo
VMA = Vacíos en agregado mineral
V_{ba} = Volumen del aglutinante absorbido
V_s = Volumen de agregado mineral

W_t = Peso total de la mezcla
W_b = Peso del aglutinante en la mezcla
W_s = Peso del agregado mineral en la mezcla

FIGURA 3-5 Componentes de mezcla de asfalto en caliente

Los criterios de selección establecidos para esta metodología fueron el resultado de cargas controladas en pistas de prueba y observaciones del rendimiento en servicio de las mezclas para una variedad de cargas de aeronaves y condiciones ambientales. Para pavimentos de carreteras, se utilizan variaciones de la metodología desarrollada por el USACE. Por ejemplo, en el procedimiento del Instituto de Asfalto (7), se selecciona el contenido de ligante correspondiente a un 4 por ciento de vacíos de aire (con base en un esfuerzo de compactación representativo del tráfico que se aplicará). Los esfuerzos de compactación varían de 35 a 75 golpes por lado para tráficos que van de ligeros a pesados. Luego, se verifican otras propiedades de la mezcla, como la estabilidad Marshall, el valor de flujo y el VMA, para determinar si se han cumplido los criterios especificados.

Método Hveem

El método de F. N. Hveem, adoptado por Caltrans desde la década de 1940, ha sido implementado por otras agencias de carreteras en el oeste de EE. UU., adaptándolo a sus necesidades. Aunque los criterios de diseño varían, el equipo de evaluación es el mismo. Su filosofía se basa en tres principios: (a) la estabilidad depende de la textura del agregado; (b) el contenido óptimo de asfalto se ajusta según el área superficial, textura, porosidad y rigidez del asfalto; y (c) se asegura un mínimo de 4% de vacíos de aire para evitar problemas como el sangrado o la pérdida de estabilidad. En laboratorio, se emplea compactación por amasado (ASTM D1561) con un esfuerzo que simula densidades obtenidas bajo tráfico tras la construcción.

El estabilómetro Hveem, una prueba de compresión triaxial de sistema cerrado, proporciona la medida clave de rendimiento en este método. Las muestras de mezcla se prueban en este dispositivo a 60°C (140°F) en un rango de contenidos de ligante, se produce una curva de estabilidad en función del contenido de asfalto, similar a la que se muestra en la Figura 3-6. Al establecer un nivel mínimo de estabilidad consistente con el tráfico aplicado, el contenido de asfalto de

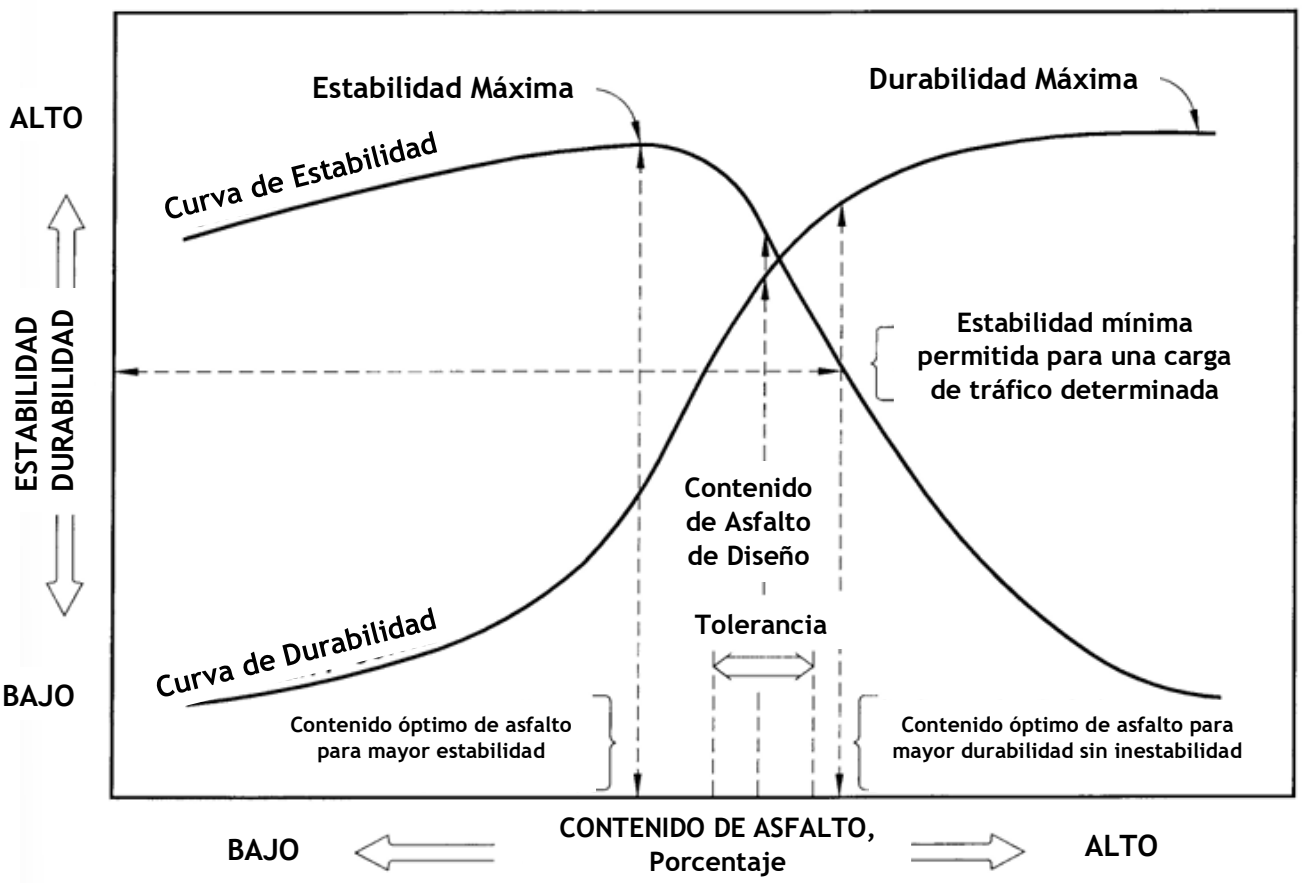


FIGURA 3-6 Esquema de la relación estabilidad-durabilidad del asfalto mezclado en caliente, que ilustra la filosofía

diseño se selecciona de manera similar a la ilustrada en la Figura 3-6. Para el mismo agregado y cemento asfáltico, los contenidos de ligante de diseño seleccionados con este procedimiento generalmente tienden a ser ligeramente más bajos que los obtenidos utilizando el procedimiento Marshall de 75 golpes del USACE.

Método Superpave

La publicación del Instituto de Asfalto Superpave Mix Design (10) es una excelente fuente de información sobre el procedimiento Superpave, al igual que The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays (11). Tal como fue concebido originalmente, el método incluía tanto un procedimiento de diseño volumétrico como pruebas de rendimiento sobre la mezcla o las mezclas resultantes del diseño volumétrico. Hasta la fecha de esta escritura, solo se estaba utilizando el procedimiento volumétrico, ya que las pruebas de rendimiento y su uso para predecir el rendimiento in situ estaban siendo sometidas a una evaluación adicional.

El diseño volumétrico de la mezcla se lleva a cabo en cuatro pasos: (a) selección de los materiales componentes, (b) selección de la estructura de agregado de diseño, (c) selección del contenido de asfalto de diseño, y (d) evaluación de la susceptibilidad a la humedad. La selección de los materiales componentes incluye la elección del grado de rendimiento adecuado del ligante y del agregado con las características necesarias para el tráfico aplicado. Como se mencionó anteriormente, tanto la temperatura alta como la baja en el sitio de la pavimentación establecen el grado de ligante a utilizar. Las características del agregado incluyen la angularidad del agregado grueso, la angularidad del agregado fino, las partículas planas y alargadas, y el contenido de arcilla. Los requisitos de diseño para el agregado aumentan a medida que el tráfico, expresado en cargas equivalentes de un solo eje de 80 kN (18,000 lbf) (ESALs), aumenta.

La gradación del agregado se define mediante el gráfico de gradación de potencia 0.45, como se ilustra en la Figura 3-3 con un ejemplo que

cumple los criterios de Superpave.

Generalmente, se evalúan tres mezclas de prueba. En lugares con poca experiencia, pueden ser necesarias más, mientras que en sitios con historial consistente podría bastar con una. El segundo paso del diseño consiste en seleccionar la estructura de agregado, basada en las propiedades de las muestras compactadas con el compactador giratorio Superpave.

Para cada mezcla, el contenido de asfalto inicial se calcula para alcanzar un 4% de vacíos de aire con un número de giros de diseño (Ndiseño), determinado según el tráfico (ESALs) y el clima. Las pavimentaciones con tráfico pesado requieren un Ndiseño alto, mientras que las de bajo volumen necesitan uno bajo. Como este contenido de asfalto es solo un valor inicial, rara vez se logra el 4% de vacíos en esta etapa. Por ello, se ajusta el contenido de asfalto y se evalúan las propiedades compactadas, estimando los parámetros necesarios para cada mezcla:

- VMA en Ndiseño,
- VFA en Ndiseño,
- Porcentaje de densidad teórica máxima en $N_{inicial}$,
- Porcentaje de densidad teórica máxima en $N_{máximo}$, y
- Proporción de polvo.

El parámetro Ninicial, derivado de Ndiseño, mide la respuesta de la mezcla durante la compactación inicial, como ocurre en el rodado de descomposición. Una alta densidad en Ninicial suele considerarse indeseable, ya que indica que la mezcla se compacta fácilmente y podría ser susceptible al desgaste. Sin embargo, esto no siempre se cumple. También se considera indeseable una alta densidad en Nmáximo, ya que representa condiciones de tráfico mucho mayores a las previstas. Al limitar la densidad en Nmáximo, se busca evitar vacíos de aire extremadamente bajos bajo tráfico inesperadamente alto.

Las mezclas de prueba se comparan con los criterios establecidos, seleccionando la mezcla que cumpla mejor con ellos, denominada estructura de agregado de diseño. Para determinar el contenido de asfalto de diseño, se compactan especímenes a Ndiseño con la estructura de agregado seleccionada, utilizando cuatro contenidos de asfalto cercanos al estimado previamente (usualmente en duplicado). Las propiedades volumétricas de la mezcla compactada, como vacíos de aire y VMA, se calculan para cada contenido. El contenido de asfalto de diseño se selecciona para alcanzar un 4% de vacíos de aire en Ndiseño, generalmente dentro de un rango de 0.1 a 0.2% del contenido estimado.

Tras definir la estructura de agregado y el contenido de asfalto de diseño, se evalúa la susceptibilidad a la humedad de la mezcla según AASHTO T283. Originalmente, para cargas de tráfico altas en Superpave, se recomendaba someter la mezcla a pruebas de rendimiento, como cizalladura simple y tracción indirecta. Sin embargo, estas pruebas están bajo revisión, y cualquier cambio dependerá de nuevas evaluaciones.

MEZCLAS DE LABORATORIO Y PRODUCIDAS EN PLANTA

Como se mencionó, pueden existir diferencias entre las propiedades de una mezcla de asfalto diseñada en el laboratorio y la "misma" mezcla producida en una planta de lote o tambor. Es importante analizar estas diferencias y entender por qué las propiedades o características de la mezcla en planta pueden variar significativamente respecto a los resultados del laboratorio.

Ligante De Cemento Asfáltico

En un tanque de almacenamiento de cemento asfáltico, el ligante se mantiene en masa y se circula continuamente, minimizando el envejecimiento. En el laboratorio, el cemento se calienta en un horno, lo que puede causar mayor envejecimiento debido al manejo en pequeñas cantidades y recipientes abiertos. Modificadores añadidos en el campo, no evaluados en el diseño de la mezcla, pueden generar diferencias entre las propiedades de la mezcla en laboratorio y en planta. Por esto, se recomienda usar los mismos materiales en ambos casos. El método Superpave incluye un envejecimiento a corto plazo para simular la rigidez de la mezcla en el primer año de vida del pavimento.

Agregado

El método Superpave requiere el análisis de tamiz lavado de todas las fracciones, incluido el relleno. A medida que el agregado pasa a través de un secador de planta por lotes o un mezclador de tambor, su gradación generalmente cambia hasta cierto punto. La cantidad del cambio (un aumento en la cantidad de finos en la mezcla) es una función de muchas variables, pero está relacionada principalmente con la dureza del agregado. A medida que disminuye la resistencia a la abrasión del agregado, normalmente aumenta la cantidad de finos generados dentro del secador o del tambor. Para un agregado duro y duradero, la cantidad que pasa por el tamiz de 0,075 mm (No. 200) no puede aumentar más del 0,2 por ciento cuando se procesa. Si se utiliza un agregado suave, la cantidad de agregado que pasa por el tamiz de 0,075 mm (Nº200) puede aumentar hasta en un 1 o 2 por ciento.

Todos los materiales variarán en gradación del valor promedio para el porcentaje que pasa por cada tamiz. Esta variación se reconoce asignando valores de tolerancia permitidos a cada tamaño de tamiz. Por lo tanto, se puede esperar que el agregado en los silos de alimentación en frío se encuentre dentro de un rango de gradaciones en lugar de ajustarse a una gradación exacta. En el laboratorio, sin embargo, el agregado se tamiza en muchas fracciones diferentes y luego se recombina para obtener una curva de granulometría exacta. El grado de precisión en el laboratorio es significativamente mayor que el de una planta de mezcla de asfalto o de tambor.

El agregado para muestras de laboratorio está completamente seco, sin humedad. En secadores de planta discontinua o de mezcla de tambor de contraflujo, la humedad puede reducirse al 0.1 por ciento, pero generalmente oscila entre el 0.1 por ciento y el 0.5 por ciento, dependiendo de la humedad inicial, la tasa de producción y la temperatura de descarga. En raras ocasiones, el agregado descargado no tendrá humedad. En plantas de tambor de flujo paralelo, la humedad al descargar la mezcla es generalmente inferior al 0.2 por ciento, pero puede ser mayor según las mismas variables. Aunque la humedad retenida en la mezcla de planta no debe superar el 0.5 por ciento, habrá diferencias con las mezclas de laboratorio, lo que puede afectar la terneza y la capacidad de densificar el HMA durante la compactación.

En el laboratorio, el calentamiento del horno suele dar lugar a un calentamiento uniforme de las partes gruesas y finas del árido. En el secador de plantas o en el mezclador de tambor, el agregado grueso generalmente se calienta a una temperatura más baja que el agregado fino, y a menudo hay una diferencia de temperatura distinta entre las dos fracciones de agregado. En una planta discontinua, la temperatura generalmente se iguala durante la mezcla de molino. Sin embargo, en una planta de mezcla de tambor de flujo paralelo o contraflujo, no siempre se obtiene un equilibrio térmico a menos que el material se mantenga en el silo de compensación durante un período de tiempo.

Si se usa un depurador húmedo en una planta de mezcla por lotes o tambor, los finos capturados se desperdician y no forman parte de la gradación del agregado. En cambio, con una cámara de filtros como control de emisiones, los finos pueden devolverse a la mezcla. Si se desperdician, la gradación de la mezcla será ligeramente diferente, similar a cuando se usa un sistema de lavado húmedo. Si todos los finos se devuelven, la gradación aún puede diferir de la del laboratorio debido a la descomposición del agregado en la planta. El equipo de control de emisiones influye en las propiedades de la mezcla asfáltica, cambiando la proporción de polvo a asfalto y la rigidez de la mezcla. Este cambio generalmente no se considera en el diseño de mezclas de laboratorio.

Sin embargo, algunos diseñadores de mezclas añaden finos de la cámara de filtros a la mezcla durante el proceso de diseño de la mezcla para simular la gradación de la mezcla después de la descomposición del material en la planta.

La eficiencia de las cámaras de filtros varía según la caída de presión entre los lados sucios y limpios de las bolsas. Con bolsas limpias y baja presión, los gases con partículas finas atraviesan el filtro, permitiendo que algunas pasen. Al acumularse más material y aumentar la presión, se capturan más finos en el recubrimiento de las bolsas. Así, la eficiencia mejora y más finos, con gradación más fina, se devuelven a la mezcla en plantas por lotes o tambores. El cambio en la cantidad de finos capturados y retornados a la planta puede ser considerable.

Si la planta solo tiene un colector seco (caja de extracción o ciclón), la mayoría de los finos devueltos serán mayores a 0,300 mm (No. 50). Con un filtro de tela, se reincorporan partículas de hasta 5 micrones, más pequeñas que el espesor de la película asfáltica.

Estas partículas ultrafinas pueden afectar la mezcla durante la construcción. Además, los finos deben devolverse de manera uniforme y consistente para integrarse en la mezcla.

Si se incorpora pavimento asfáltico recuperado (RAP) a la mezcla, normalmente se mezcla en el laboratorio hasta que se calienta completamente y se mezcla con el nuevo agregado. En la planta, sin embargo, el grado de mezcla y la transferencia de calor del nuevo agregado al material recuperado son funciones de muchas variables, como la cantidad de RAP en la mezcla, el punto de introducción del RAP, la temperatura del nuevo agregado y la cantidad de tiempo de mezcla disponible. La mezcla de RAP con el nuevo agregado difiere para una planta de lotes, una planta de mezcla de tambor de flujo paralelo y una planta de mezcla de tambor de contraflujo. Sin embargo, la mezcla del RAP con el nuevo agregado en el laboratorio es siempre la misma, independientemente del tipo de planta que se utilizará para fabricar la mezcla de HMA.

En el laboratorio, el RAP utilizado en el diseño de la mezcla el proceso puede ser una muestra representativa de los materiales a recuperar del proyecto de pavimentación. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la gradación de los agregados y el contenido de asfalto del RAP realmente incorporado a la mezcla pueden variar de los valores obtenidos de la muestra representante. La molienda y el procesamiento para recuperar material pueden agregar una cantidad significativa de finos [porcentaje que pasa por el tamiz de 0,075 mm (No. 200)] a la mezcla. El alcance de esta variabilidad esperada debe considerarse durante el proceso de diseño de mezclas en el laboratorio.

Proceso de mezcla

A medida que aumenta el tiempo de mezcla en una planta de lotes, también crece el envejecimiento del aglutinante asfáltico. Con tiempos cortos (28-35 s), la penetración del asfalto disminuye entre 30 % y 45 %, mientras la viscosidad aumenta en igual proporción. Con tiempos más largos (hasta 45 s), la penetración puede reducirse hasta un 60 %, y la viscosidad cuadruplicarse. Altas temperaturas endurecen más el asfalto, haciendo la mezcla más rígida que en laboratorio con asfalto sin envejecer. En el diseño Superpave, el endurecimiento se simula envejeciendo la mezcla a corto plazo antes de la compactación.

El endurecimiento del cemento asfáltico en una planta de mezcla de tambor puede ser menor, mayor o similar al de un molino de planta por lotes. Varía según factores como la composición y el grosor de la película de asfalto alrededor del agregado, entre otros. Generalmente, ocurre menos endurecimiento cuando aumenta el contenido de humedad del agregado nuevo y recuperado, cuando aumenta el volumen de agregado en el tambor, cuando disminuye la temperatura de descarga de la mezcla y cuando aumenta la tasa de producción de la planta. Además, una planta de mezcla de tambor de contraflujo provoca mucho menos endurecimiento que una de flujo paralelo. Incluso con el procedimiento de envejecimiento del método de diseño de mezclas Superpave, la correlación entre el envejecimiento del ligante en una planta de mezcla de tambor, especialmente en una de flujo paralelo, y el envejecimiento durante el procedimiento de envejecimiento a corto plazo es aproximada.

El proceso de mezcla en laboratorio se realiza a mano o a máquina, con el tiempo necesario para mezclar el cemento asfáltico y el agregado, dependiendo de la eficiencia del proceso. Generalmente, se requieren varios minutos para cubrir completamente el agregado. Durante este tiempo, el cemento asfáltico se expone al aire y se endurece, lo cual depende de la temperatura del agregado y del tiempo de mezcla. Este endurecimiento difiere del que ocurre en plantas de mezcla por lotes o tambores. Las muestras de mezcla asfáltica, obtenidas de la planta o del pavimento antes de la compactación, pueden enviarse al laboratorio para futuras pruebas. El grado de endurecimiento depende del tiempo entre la fabricación y la prueba, así como de las condiciones de almacenamiento (temperatura y oxígeno). El recalentamiento de la muestra y su remezcla también pueden afectar las propiedades de la mezcla. Así, el proceso en el laboratorio puede influir en las diferencias entre las muestras preparadas en planta y en laboratorio.

Compactación

Se utilizan varios métodos, como la compactación por impacto (martillo Marshall), amasado y compactación giratoria Superpave, para compactar muestras de HMA en el laboratorio. El objetivo es simular, lo más fielmente posible, la orientación de las partículas y la carga de tráfico producida en el campo.

Los resultados de las pruebas intra e inter - laboratorio han indicado que el grado de compactación obtenido en el laboratorio puede ser muy variable, dependiendo del método utilizado. El proceso de compactación en el laboratorio es rápido, usualmente se completa en menos de 5 minutos, a diferencia del campo, donde el

uso de combinaciones y pasadas de rodillos puede demorar hasta 30 minutos o más para alcanzar la densidad final. Además, en el laboratorio, la temperatura de la mezcla se mantiene constante, mientras que, en el campo, disminuye con el tiempo. En el laboratorio, el esfuerzo de compactación se aplica antes de que la mezcla baje a 115 °C (240 °F) para los métodos Marshall y Superpave, o 105 °C (220 °F) para el método Hveem. En el campo, la mezcla puede enfriarse a 80 °C (175 °F) antes de terminar la compactación.

En el laboratorio, la mezcla asfáltica se compacta sobre una base sólida, mientras que en el campo varían los tipos de base y rigideces. Puede colocarse en pavimentos nuevos, como primera capa sobre un suelo blando o como capa superficial en pavimentos de profundidad completa. También se usa para recubrir pavimentos de asfalto envejecido o PC. La densidad alcanzada en la mezcla depende de la rigidez de la base y del equipo de compactación utilizado. Las diferencias entre algunas condiciones de pavimento y de base de laboratorio pueden ser significativas. Es necesaria una sección de prueba para establecer el esfuerzo de compactación y el patrón de rodadura requerido para obtener una densidad especificada en la mezcla asfáltica.

RESUMEN

El objetivo de probar mezclas asfálticas en plantas es comparar los resultados con la fórmula de mezcla de laboratorio. Se busca que la mezcla de planta sea igual a la de laboratorio, pero esto es difícil debido a las variables de la planta, como el tipo y las condiciones de operación. A menudo hay diferencias en la gradación y redondeo de los agregados, el grado de endurecimiento del cemento asfáltico y la pérdida de finos por el sistema de control de emisiones. Las causas principales incluyen el método de mezcla, el contenido de humedad y el aumento de finos. Además, las condiciones de compactación difieren entre el laboratorio y el campo.

La fórmula de mezcla de trabajo del laboratorio debe ser el diseño inicial. Como se explica en la sección de control de calidad, las propiedades deseadas deben verificarse en la mezcla asfáltica compactada producida en la planta. Se deben hacer pruebas diarias para verificar las características de la mezcla fabricada.

Todos los valores de la mezcla deben estar dentro del rango requerido por el proceso de diseño de la mezcla. Si los resultados de las pruebas de la mezcla producida por la planta indican el cumplimiento de los requisitos de la fórmula de la mezcla de trabajo, la planta debe seguir funcionando. Si una o más de las propiedades de la mezcla están fuera del rango deseado, se debe realizar rápidamente una investigación para determinar la causa y el alcance de la deficiencia. En la mayoría de los casos, sin embargo, la planta no debe cerrarse o hacerse cambios drásticos en el diseño de la mezcla sobre la base de un solo conjunto de resultados de pruebas. Además, si existen diferencias importantes en la gradación entre el agregado utilizado en el proceso de diseño de mezclas de laboratorio y el agregado utilizado en la planta, se debe ajustar la fórmula de la mezcla de trabajo o desarrollar un nuevo diseño de mezcla.

Problemas que se desarrollan en la planta de mezcla por lotes o tambores y en el pavimento durante el proceso de colocación y compactación se discuten en la Sección 19. Algunos de estos problemas, como el control y el empuje, pueden estar relacionados con deficiencias en el diseño de la mezcla utilizada para crear la fórmula de la mezcla de trabajo y con las diferencias entre las propiedades de la fórmula de la mezcla de trabajo y las propiedades de la mezcla realmente producida en la planta.

REFERENCIAS

1. Nijboer, L. W. *Plasticity as a Factor in the Design of Dense Bituminous Carpets*. Elsevier Publishing Co., New York, 1948.
2. Goode, J. F. and L. A. Lufsey. A New Graphical Chart for Evaluating Aggregate Gradations. *Proceedings*, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 31, 1962, pp. 176–207.
3. Santucci, L. E., and R. J. Schmidt. Setting Rate of Asphalt Concrete. *Bulletin 333*, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1962, pp.1–9.

4. Vallerga, B. A., and W. R. Lovering. Evolution of the Hveem Stabilometer Method of Designing Asphalt Paving Mixtures, *Proceedings*, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 54, 1985, pp. 243–264.
5. *Highway Research Board Research Report No. 7-B: Symposium on Asphalt Paving Mixtures.* Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1949.
6. *Flexible Airfield Pavements.* TM5-824-2. Department of the Army, 1969.
7. *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types*, 6th ed. MS-2. The Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1994.
8. Hveem, F. N. Bituminous Mixtures. *Proc., Ninth Annual Highway Engineering Conference*, University of Utah, 1938.
9. California Test Method Nos. 302, 304, 305, 306, 307, 308, 366, and 367. *Materials Manual,* Vol. 2, California Department of Transportation, Sacramento.
10. *Superpave Mix Design.* SP-2. The Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1996.
11. Cominsky, R. J., G. A. Huber, T. W. Kennedy, and R. M. Anderson. *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays.* SHRP-A-407. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington D.C., 1994.

4 Control de Calidad/ Aseguramiento de Calidad

Las especificaciones para la construcción de carreteras son un medio para un fin. Su objetivo es proporcionar al público un pavimento adecuado y económico que permita a los vehículos desplazarse de manera fácil y segura de un punto a otro. Una especificación práctica está diseñada para garantizar un desempeño adecuado al menor costo posible; una especificación realista tiene en cuenta las variaciones en materiales y métodos de construcción que son inevitables y características incluso de las mejores obras en la actualidad.

Las agencias de transporte han utilizado tradicionalmente especificaciones por método para definir y aceptar los materiales y la construcción de HMA. En este tipo de especificaciones, la agencia establece los métodos que deben usarse en la construcción de una sección de pavimento. Si el contratista sigue los métodos prescritos y su cumplimiento es verificado por el inspector, se asegura el pago total al contratista. Una de las principales deficiencias de estas especificaciones es que los ajustes de precio por incumplimiento del contratista suelen ser arbitrarios y basados únicamente en el criterio del inspector o del ingeniero de la agencia. Los conceptos estadísticos rara vez se aplican en las especificaciones por método, lo que hace que la aceptación basada en este enfoque sea algo subjetiva.

En los últimos 20 años, muchas agencias han adoptado especificaciones en las que el contratista es responsable del control de calidad (CC) y tiene la libertad de elegir los métodos de construcción. Se especifica el resultado final deseado, y el contratista o productor tiene la máxima flexibilidad posible para alcanzarlo. Sin embargo, generalmente se incluyen ciertas restricciones para garantizar un nivel mínimo aceptable de calidad y evitar que se produzcan errores graves antes de ser detectados. Por lo tanto, el aumento del uso de especificaciones CC/AC refleja un cambio en la responsabilidad de elegir los métodos de construcción adecuados y del control de calidad, pasando de la agencia al contratista.

Este capítulo se centra en el control de calidad (CC) y la garantía de calidad (AC) bajo ambos tipos de especificaciones. Primero, se definen CC y AC. Luego, se revisan las especificaciones por método y las especificaciones CC/AC. Cabe señalar que, dentro de estas dos clases amplias de especificaciones, existen muchas variaciones detalladas según el propietario del proyecto, y que la mayoría de las especificaciones reales combinan características de ambos tipos. Además, se ofrece orientación sobre el CC/AC para la producción y colocación de Superpave en el Informe 409 del NCHRP: "Control de calidad y aceptación del asfalto diseñado con Superpave".

DEFINICIONES

Control de Calidad

La calidad de la HMA puede definirse en términos de las características (por ejemplo, contenido de asfalto, vacíos de aire, densidad) requeridas para alcanzar un nivel específico de excelencia (ver Sección 3). En el caso de los materiales o la construcción de HMA para carreteras, la excelencia se mide de acuerdo con un cierto nivel de desempeño, expresado en términos de características como durabilidad, calidad de rodadura y seguridad. El control de calidad o control de procesos de la HMA implica mezclar y colocar los ingredientes de la HMA (agregados y asfalto) de manera prescrita, de modo que sea razonable esperar que el pavimento funcione correctamente.

Es importante distinguir entre el control de procesos y las pruebas de aceptación. Las pruebas de aceptación se basan en el principio de estimar los parámetros de una característica de un lote mediante un muestreo aleatorio limitado. Un lote es una cantidad de material (por ejemplo, la producción de un día, 1,000 metros lineales, 1,500 toneladas métricas) producida bajo condiciones esencialmente iguales. El muestreo aleatorio es un procedimiento en el que cada parte del lote tiene la misma probabilidad de ser seleccionada como muestra. Normalmente, los parámetros estimados son el nivel de calidad aceptable y una medida de variabilidad o dispersión. Es responsabilidad de la agencia aceptar el lote con pago total, pago con incentivos o pago reducido, o rechazarlo por completo.

Por otro lado, el control de procesos es el medio para realizar verificaciones adecuadas durante la producción (o construcción) para minimizar el riesgo del contratista o productor de que el lote sea rechazado. Se dice que un proceso está bajo control cuando todas las variaciones corregibles se han ajustado dentro de las tolerancias. De hecho, un propósito principal del control de procesos es eliminar las causas asignables de variación para que la

variabilidad total del lote final se aproxime a la variación utilizada para diseñar el plan de muestreo para la aceptación del lote. Por lo tanto, puede decirse que el control de procesos es un esfuerzo por mantener un nivel de producción dado en términos del nivel aceptable y el grado de uniformidad, mientras que las pruebas de aceptación verifican el producto final para determinar en qué medida se han alcanzado estos objetivos.

Actualmente, muchas agencias exigen que el productor o contratista de HMA sea el único responsable de todas las actividades de CC, incluidas las pruebas y ajustes necesarios para producir un pavimento HMA que cumpla con todos los aspectos del desempeño esperado. El CC incluye probar y observar la calidad de los agregados comprados en minas y canteras para garantizar la uniformidad; establecer las proporciones en el alimentador en frío o configurar los pesos de las tolvas calientes (cuando sea necesario), agregar la cantidad correcta de asfalto, determinar los tiempos y técnicas de mezcla; y establecer las técnicas correctas de colocación y compactación. Lo más importante es que el control de calidad implica realizar pruebas constantes y evaluar los resultados para determinar si la producción está bajo control. También incluye las acciones del personal de la planta para realizar los cambios y ajustes necesarios en las operaciones diarias.

La FHWA define el CC como "todas las técnicas y actividades realizadas por el contratista/proveedor para cumplir con los requisitos del contrato". Según la AASHTO, es "el conjunto de actividades del vendedor (productor, fabricante y/o contratista) para garantizar que un producto cumpla con las especificaciones del contrato", incluyendo manejo de materiales, calibración y mantenimiento de equipos, control del proceso de producción, así como muestreo, pruebas e inspecciones necesarias.

Aseguramiento de la Calidad

Una definición general del aseguramiento de la calidad (CC) incluye todas las actividades necesarias para garantizar que la calidad de un producto sea la adecuada. La frase "garantizar la calidad de un producto" se refiere a las decisiones necesarias para confirmar la conformidad con las especificaciones, mientras que "la adecuada" hace referencia a las propiedades de ingeniería esenciales del material o del proceso de construcción.

AASHTO y FHWA definen el AC como “todas las acciones planificadas y sistemáticas necesarias para proporcionar confianza en que un producto o servicio cumplirá con los requisitos de calidad establecidos.” Esta definición presenta al AC como un concepto integral que abarca el control de calidad (CC), la aceptación y la garantía independiente.

La aceptación se define como “todos los factores que componen la determinación del propietario sobre la calidad incluyen muestreo, pruebas e inspecciones de verificación, y pueden incluir resultados de pruebas de CC. La garantía independiente abarca aquellas actividades diseñadas para ofrecer una evaluación imparcial e independiente de todos los procedimientos de muestreo y pruebas utilizados en el programa de aceptación. El AC puede visualizarse como un taburete de tres patas: CC, aceptación y garantía independiente, que sustentan la operación del AC.

ESPEFICIACIONES POR MÉTODO

Las especificaciones por método fueron probablemente las más utilizadas en la construcción de carreteras hasta mediados de la década de 1980. En este tipo de especificaciones, la agencia instruye al contratista sobre el uso de métodos específicos, que incluyen materiales, proporciones y equipos. Además, el proceso de colocación está claramente definido, con cada paso controlado o dirigido, y en algunos casos, ejecutado directamente por un representante de la agencia.

En relación con la producción de HMA, estas especificaciones exigen que los materiales componentes, como el cemento asfáltico, los agregados y los aditivos, sean preevaluados y aprobados. También se especifican las proporciones de los materiales y el método de mezcla. Frecuentemente, la agencia realiza el diseño de la mezcla y establece la fórmula para el proyecto. La mezcla debe cumplir con requisitos adicionales, como vacíos de aire, estabilidad y flujo. En casos extremos, estas especificaciones pueden considerarse similares a un contrato de alquiler de equipos y mano de obra. Por ejemplo, para la compactación del HMA, la agencia podría indicar al contratista qué equipo usar, cuándo compactar y cuántas pasadas realizar con cada rodillo.

Las especificaciones por método han evolucionado con el tiempo debido a la falta de pruebas rápidas de aceptación que evalúen la calidad de los materiales y la construcción. En la mayoría de los casos, las decisiones de CC y aceptación se basan en los resultados de pruebas individuales.

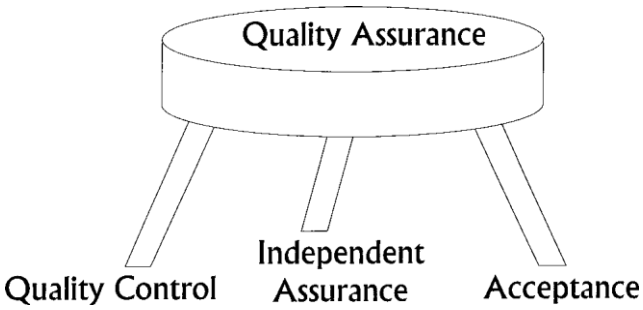


FIGURA 4-1 Elementos del Aseguramiento de Calidad

la especificación de HMA de una agencia establece:

> Si en algún momento durante el curso del trabajo no se cumplen las determinaciones de asfalto, gradaciones y los criterios de Marshall especificados en este documento, o en caso de desviaciones persistentes o recurrentes en cualquiera de estas características, el contratista deberá, cuando se le indique, realizar los cambios necesarios en la [fórmula de mezcla de trabajo], en los materiales o en el equipo para cumplir con una conformidad razonablemente cercana a estos requisitos.

Ventajas y Desventajas de las Especificaciones por Método

Las especificaciones por método ofrecen una ventaja cuando es particularmente difícil definir una medida de calidad. La segregación en las mezclas asfálticas es un caso de este tipo. La segregación es una característica no deseada, pero el grado permitido de segregación es difícil de medir o especificar. Por lo tanto, las especificaciones por método pueden utilizarse para indicar lo que un contratista debe hacer para prevenir la segregación.

Sin embargo, las especificaciones por método tienen varias desventajas:

- Los contratistas pueden no tener permitido utilizar los procedimientos más económicos o innovadores para producir el producto.
- La inspección requiere mucha mano de obra.
- Si la calidad del producto se mide y resulta ser menos que deseable, el contratista no tiene responsabilidad legal de mejorarla.
- La agencia asume la mayor parte del riesgo asociado con las especificaciones.
- Es difícil relacionar la calidad alcanzada con el desempeño del producto terminado.

La principal debilidad de este tipo de especificación es que no garantiza que se logre la calidad deseada en la construcción. Lo más importante es que, al especificar explícitamente los materiales y procedimientos, el propietario o la agencia se obliga, en gran medida, a aceptar el producto final. Además, este tipo de especificación es muy difícil de aplicar de manera uniforme. Los términos "conformidad razonablemente cercana" y "cumplimiento sustancial" no pueden definirse con precisión. En ausencia de un nivel de calidad claramente establecido y un medio uniforme para medir el cumplimiento, las decisiones se vuelven proceso de producción y del producto deseado.

Actividades de Control de Calidad del Contratista

Muchos proyectos de pavimentación se han realizado con éxito utilizando especificaciones por método. Todo contratista exitoso de HMA controla la calidad de la mezcla durante todo el proceso de producción. Las pruebas para garantizar la calidad comienzan con los agregados en bruto y terminan con el pavimento terminado. Cada prueba tiene un lugar en el sistema general de control, desde el diseño de la mezcla de trabajo hasta la dosificación, mezcla y colocación de la HMA.

Control de Agregado en la Planta

Las cualidades de diseño son la principal consideración al seleccionar los agregados para una fórmula de mezcla de trabajo. La decisión sobre qué agregado usar se basa únicamente en los datos de prueba obtenidos en las canteras o bancos de origen, mucho antes de que el material llegue a la planta de producción de la mezcla. Las características generales y propiedades físicas de los agregados para superficies y bases de HMA están definidas en las Especificaciones Estándar para Materiales de Transporte de AASHTO. Además, las agencias suelen tener sus propios estándares. Los agregados en bruto deben provenir de fuentes aprobadas por la agencia y deben ser probados para verificar el cumplimiento de los estándares de calidad designados.

Control de Asfalto en la Planta

El asfalto generalmente se adquiere de una fuente probada y aceptada por la agencia o aceptada sobre la base de la certificación del proveedor. El costo y las preferencias locales pueden influir en la selección del proveedor. En muchas áreas, el acuerdo de compra con el proveedor de asfalto exige la certificación de los resultados de prueba de una corrida de producción o de un lote identificable de material. Procedimientos estrictos de CC también pueden requerir que el transportista que suministra el material a la planta proporcione un "certificado de carga previa", lo que protege al proveedor de la carga de disputas por contaminación durante el transporte. Estos requisitos deben especificarse al formalizar un acuerdo de compra. El personal de CC de la planta realiza pocas pruebas de control para el asfalto. A veces se hacen pruebas de penetración en el laboratorio de la planta para detectar contaminación durante el transporte. Es recomendable tomar muestras aleatorias de las cargas entrantes para futuras pruebas si es necesario. La agencia también puede muestrear el asfalto en la planta y hacer pruebas en su laboratorio, usando muestras almacenadas en el sitio si hay dudas sobre la calidad del asfalto. Las variaciones en las propiedades del asfalto a menudo no se detectan porque estas propiedades no se prueban con

frecuencia. Esto representa un problema potencial, ya que si las propiedades del asfalto cambian de lote a lote, las propiedades de la mezcla y las características de colocación de la mezcla caliente también pueden variar. Estas variaciones pueden ser monitoreadas si el técnico de CC de la planta lee y mantiene un archivo con los certificados de pruebas enviados por el proveedor de asfalto.

La temperatura del asfalto entrante debe ser monitoreada de cerca. Las especificaciones establecen límites para la temperatura permitida en los tanques de almacenamiento de asfalto. El sobrecalentamiento por parte del proveedor o transportista es motivo para rechazar el cemento asfáltico.

Control de Mezclas en Planta

El control de mezclas en la planta incluye una serie de elementos tan interrelacionados que resulta difícil separarlos. Una sola prueba puede cumplir varias funciones, satisfaciendo diversas necesidades de CC. Los elementos básicos relacionados con las mezclas que requieren pruebas de CC son los siguientes:

- Diseño de Mezcla
  - Selección del cemento asfáltico
  - Selección de los agregados
  - Desarrollo de la fórmula de mezcla de trabajo
  - Selección de una temperatura de mezcla
- Control y pruebas diarias en planta
  - Gradaciones de pilas o alimentación en frío
  - Gradaciones de binas calientes (plantas por lotes)
  - Ajustes en la alimentación en frío
  - Ajustes en el peso de las binas calientes
  - Pruebas de contenido en asfálto
  - Gradación del agregadado en la mezcla
  - Ajustes de tiempo y temperatura de mezcla
    - Preparación de especímenes de Marshall, Hveem o Superpave para las pruebas:
    - VMA
    - VFA
    - Densidad
    - Flow (solo Marshall)
    - Estabilidad (solo Marshall y Hveem)

Control en el Campo de la Colocación

El CC debe ejercerse durante la colocación y ser monitoreado mediante pruebas y mediciones individuales. El éxito del CC durante la colocación depende de realizar correcciones mientras la mezcla está caliente y cuando un problema puede ser corregido activamente. Un paso para producir un producto de calidad es construir una franja de prueba al inicio del proyecto. Los siguientes controles de colocación deben ser monitoreados de cerca por el contratista:

- Velocidad de la pavimentadora
- Aplicación de capa de liga
- Tasa de entrega de HMA
- Ajustes de la pavimentadora
- Control de nivelación
- Control de densidad
- Control de espesor
  - Temperatura del aire y de la mezcla
  - Tipo de rodillo
  - Patrón y cobertura de compactación
  - Velocidad del rodillo
- Control de espesor proyectado
- Control de suavidad

Documentación del Control de Calidad

El contratista debe mantener registros adecuados de todas las inspecciones y pruebas de CC. Estos registros deben indicar la naturaleza y el número de observaciones/pruebas realizadas, las acciones correctivas cuando sean necesarias, y las cantidades aprobadas o rechazadas. En la mayoría de los casos, los datos tabulares se documentan como se muestra en la Tabla 4-1. En este ejemplo de contenido de asfalto, se comparan los resultados individuales de las pruebas con la fórmula del trabajo y las tolerancias permitidas.

Algunos contratistas grafican estos datos tabulares en un gráfico de CC, conocido como gráfico de "línea recta" o "tendencia". En este gráfico, el eje vertical representa el contenido de asfalto y los puntos de datos (conectados por líneas rectas) corresponden a los resultados de las pruebas según el orden (fechas) en que fueron obtenidos. Se incluyen la fórmula del trabajo y las tolerancias permitidas por la agencia. Estas tolerancias se muestran como líneas horizontales que interceptan el eje vertical en los puntos correspondientes. Los datos graficados muestran la condición o tendencia del proceso de producción de HMA en relación con el contenido de asfalto y las tolerancias permitidas. Datos similares deben documentarse para todas las pruebas medibles. Aunque no tan eficientes como las especificaciones de CC/AC, estos registros proporcionan al contratista la información necesaria para realizar ajustes o cambios en las operaciones diarias.

Pruebas de Aceptación por Agencia

Las pruebas de aceptación asociadas con las especificaciones de método se realizan bajo la autoridad de la agencia para asegurar que el producto cumpla con las especificaciones. Este proceso generalmente incluye la evaluación de pruebas y observaciones del mezcla caliente y del pavimento finalizado.

Las pruebas de aceptación pueden ser realizadas por técnicos empleados por la agencia o consultores contratados por esta, o pueden implicar la supervisión y observación de las pruebas de CC realizadas por el contratista. Si un inspector de la agencia está observando las pruebas, se puede requerir que el contratista realice ciertas pruebas a frecuencias establecidas. Estas pruebas pueden incluir:

- Pruebas de contenido de aslfalto,
- Gradación (de tamaños de tamiz específicos),
- Pruebas de estabilidad Marshall/Hveem,
- Densidad de especimenes compactados en en el laboratorio (gravedad especifica)
- Pruebas volumétricas (vácios de aire, VMA, VFA),
- Pruebas de densidad del pavimento
- Suavidad

La mayoría de las especificaciones de la agencia requieren muestreo y pruebas diarias para la aceptación. Como se mencionó anteriormente, la aceptación generalmente se basa en "cumplimiento sustancial", "conformidad razonablemente cercana" o "satisfacción del ingeniero" en relación con las especificaciones de la agencia.

ESPECIFICACIONES DE CONTROL/ASEGURAMIENTO DE CALIDAD (CC/AC)

Ventajas y Desventajas de las Especificaciones de CC/AC

La principal ventaja de las especificaciones CC/AC para las agencias es que colocan la responsabilidad de la calidad de los materiales y la construcción en el contratista o productor. Otras ventajas incluyen registros más completos de la construcción, decisiones de aceptación estadísticamente defendibles y ahorros en costos laborales para el personal técnico de la agencia cuando se implementan completamente las especificaciones CC/AC.

Las ventajas de las especificaciones CC/AC para los contratistas y productores provienen de una mayor libertad en la elección de materiales y equipos, así como en el diseño de las mezclas más económicas que cumplen con los requisitos especificados. Quizás el mayor beneficio provenga de los procedimientos de aceptación por lotes que se incorporan en la mayoría de las especificaciones CC/AC. Cuando los lotes son aceptados inmediatamente, aceptados condicionalmente con una reducción en el pago o rechazados, los contratistas o productores comprenden su situación. Una reducción en el precio aplicada con firmeza atrae casi siempre la atención de la alta dirección, lo que permite tomar medidas correctivas antes de que se produzcan grandes cantidades de material o construcción fuera de las especificaciones

TABLA 4-1 Datos de Control de Calidad para el Contenido de Asfalto

Fecha	Porcentaje de Asfálto	JMF	Tolerancia	Rango Permitido
Junio 4	6.1	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 4	6.4	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 5	5.8	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 5	5.8	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 6	6.0	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 7	6.2	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 8	5.8	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 10	5.6	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 10	6.0	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 11	6.2	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 11	5.9	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 12	5.8	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 12	5.9	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 13	5.9	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 14	6.0	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 14	6.2	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 15	6.3	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 17	6.0	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 17	6.0	6.0	±0.4	5.6-6.4
Junio 18	6.3	6.0	±0.4	5.6-6.4

Nota: JMF = fórmula de mezcla de trabajo

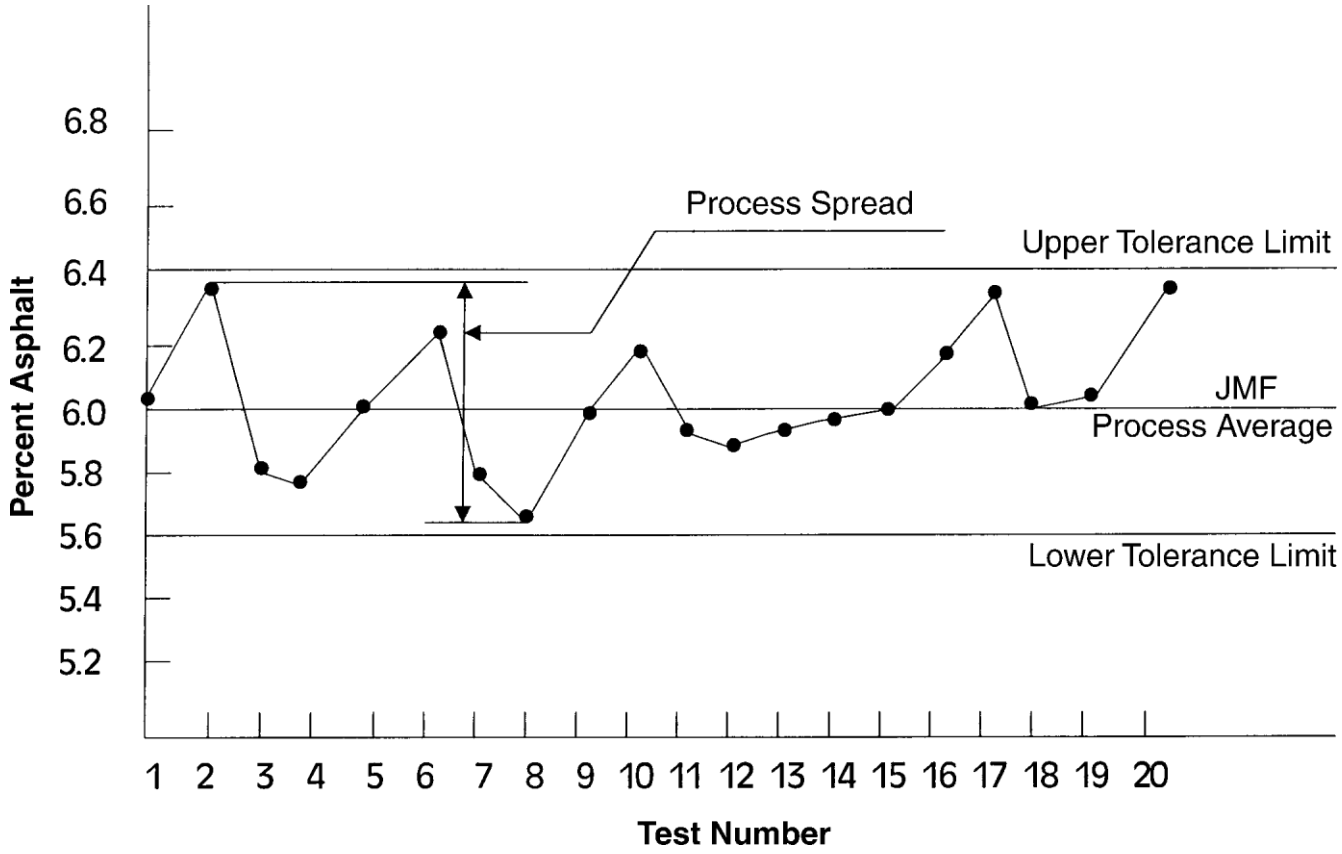


FIGURA 4-2 Contenido de asfalto en la mezcla de pavimentación.

y evitar la inmovilización de capital cuando el pago se retrasa debido a resultados de pruebas fallidas. La principal ventaja tanto para la agencia como para el contratista es que los riesgos para ambas partes pueden cuantificarse y equilibrarse.

Tanto los contratistas como las agencias deben enfrentar algunos desafíos bajo las especificaciones de Control de Calidad y Aseguramiento de la Calidad (CC/CA). Al utilizar por primera vez estas especificaciones, las agencias pueden encontrar resistencia por parte de los contratistas debido al impacto desconocido en los costos y las ganancias de los contratistas. Inicialmente, los precios de las ofertas pueden aumentar. Los contratistas pequeños pueden creer que no pueden permitirse mantener técnicos de CC a tiempo completo cuando la posibilidad de obtener contratos exitosamente es incierta. Estas organizaciones podrían tener que contratar a un laboratorio de pruebas para realizar el trabajo de CC. Si las agencias desean supervisar algunas propiedades del CC además de realizar su propio muestreo y AC, deberán prever un aumento en la carga de trabajo debido al mayor número de pruebas requeridas. La verificación puntual de los sistemas de CC del contratista puede requerir personal más calificado que aquel empleado por la agencia únicamente para tareas de inspección.

Actividades de control de calidad

La mayoría de las especificaciones de CC/CA establecen que el contratista sea responsable del control de calidad. Asociado con este requisito está la presentación de un plan de control de calidad del proceso (plan de CC). Cada agencia tiene diferentes requisitos para el plan de CC, pero esencialmente, el plan detalla los requisitos mínimos en cuanto al número de pruebas a realizar, la frecuencia de las pruebas, y la representación gráfica de los resultados (gráficos de control), así como los criterios para tomar medidas cuando un proceso fuera de control deba ser corregido. Otros factores que podrían incluirse en un plan de CC son el número y la frecuencia de las inspecciones de la planta, la verificación de las calibraciones y el tipo y cantidad de documentación que se debe mantener.

La discusión previa sobre las actividades de CC para el control de planta en agregados, asfalto, mezclas y colocación bajo especificaciones por método también es aplicable a las especificaciones CC/AC. Estas actividades de CC son la base para la construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente (HMA) de calidad. La principal diferencia con las especificaciones CC/AC es que la variación se reconoce por parte de la agencia al establecer los límites permisibles. Es esta variación la que el contratista intenta identificar y controlar.

La calidad medida de un producto manufacturado como la HMA siempre está sujeta a cierta cantidad de variación atribuible a factores como el tipo de asfalto, el tipo de agregado, el tipo de planta, los procedimientos de acopio, las pruebas, el operador y el equipo. Las causas atribuibles son parte de todo proceso de HMA y pueden reducirse, pero generalmente no eliminarse. En un sistema estable de producción e inspección de HMA, la variación aceptable es inevitable. Sin embargo, se deben identificar y corregir las razones de una variación excesiva. Este tipo de variación se denomina causas atribuibles y está asociada a factores que pueden eliminarse, permitiendo identificar la tendencia del proceso y reducir la variabilidad. Ejemplos de causas atribuibles de variación incluyen configuraciones incorrectas de las compuertas de alimentación en frío, bombas de asfalto con mal funcionamiento, pruebas realizadas incorrectamente, cambios en la granulometría de los acopios que resultan en un desplazamiento de la fórmula de mezcla de trabajo, y equipos descalibrados.

Gráficos de Control de Calidad

La mayoría de los planes de CC indican el uso de gráficos de control de calidad para evaluar tendencias en los datos, identificar causas atrubibles o verificar que el proceso de producción de HMA esté bajo control. Es importante enfatizar que los gráficos de control no sirven para colocar o mantener un proceso de HMA bajo control; es responsabilidad del contratista controlar el proceso de HMA. Los gráficos de control simplemente proporcionan una advertencia visual para que el contratista investigue posibles problemas en el proceso de producción o colocación de HMA. Además de facilitar la detección temprana de problemas, el uso de gráficos de control con las especificaciones de CC/CA ofrece una serie de beneficios. Los gráficos pueden utilizarse

- Disminuir la variabilidad,
- Establecer procesos de calidad,
- Reducir los costes de ajustes de precios,
- Disminuir la frecuencia de inspección,
- Brindar una base para modificar las tolerencias,
- Servir como registro permanente de calidad,
- Proporcionar una base de aceptación, e
- Inculcar la conciencia de calidad

Una descripción más detallada sobre el uso de gráficos de control se puede encontrar en la publicación QIP 97, *Control de calidad de plantas de mezcla en caliente y operaciones de pavimentación de la Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos (2).*

Gráficos de Promedio Movil y Rango Movil

Hay muchas formas diferentes de representar gráficamente los datos (por ejemplo, los resultados de las pruebas). Los métodos más sencillos son los gráficos de medias móviles y de intervalos móviles. Estos gráficos representan los datos en una secuencia temporal que permite identificar las tendencias de los datos. Por lo que respecta a los materiales de construcción, los gráficos pueden trazarse indicando los límites de la especificación, lo que facilita la identificación de los resultados de las pruebas que están fuera de los requisitos de la especificación. Varios organismos y contratistas han adoptado este tipo de gráficos con bastante éxito. Las figuras 4-3 y 4-4 son ejemplos de gráficos de media móvil y de rango móvil, respectivamente. El gráfico de media móvil puede utilizarse para controlar las propiedades para las que se aplicarán reducciones de precio por incumplimiento de las especificaciones o tolerancias de la mezcla, como el contenido de asfalto, los vacíos de aire y la gradación. Dado que la desviación de un proceso de HMA con respecto al objetivo (fórmula de mezcla de la obra) se detecta en una fase temprana del proceso, pueden efectuarse correcciones antes de que se produzcan consecuencias indeseables. El rango es la diferencia entre la medida más pequeña y la más grande de un grupo de medidas. El rango más fácil de calcular es una diferencia móvil de dos, que es simplemente la diferencia entre una medición y la que le sigue. El rango mide la variabilidad y puede utilizarse para estimar la parte de la dispersión total atribuible a la variación entre lotes y a las variaciones debidas al muestreo y las pruebas. A menudo se utiliza un gráfico de los valores trazados de una diferencia móvil de dos mediciones en conexión con un gráfico de la media móvil de las mediciones. La media móvil muestra si la media del proceso HMA está cerca del valor objetivo o de la fórmula de la mezcla del trabajo, mientras que el gráfico de la gama móvil muestra si la dispersión del proceso HMA está por debajo de los límites permisibles cuando la media del proceso HMA es constante y está cerca del valor adecuado.

Gráficos de Control de Calidad Estadística

Los gráficos de promedio móvil simple y de rango móvil no permiten una evaluación completa de los datos de HMA desde un punto de vista estadístico. Un enfoque más poderoso es el uso de un gráfico de control estadístico. El principal objetivo de estos gráficos es identificar causas asignables de variación que aumentan la dispersión de las mediciones. Como se mencionó anteriormente, una causa asignable es aquella que puede localizarse y eliminarse.

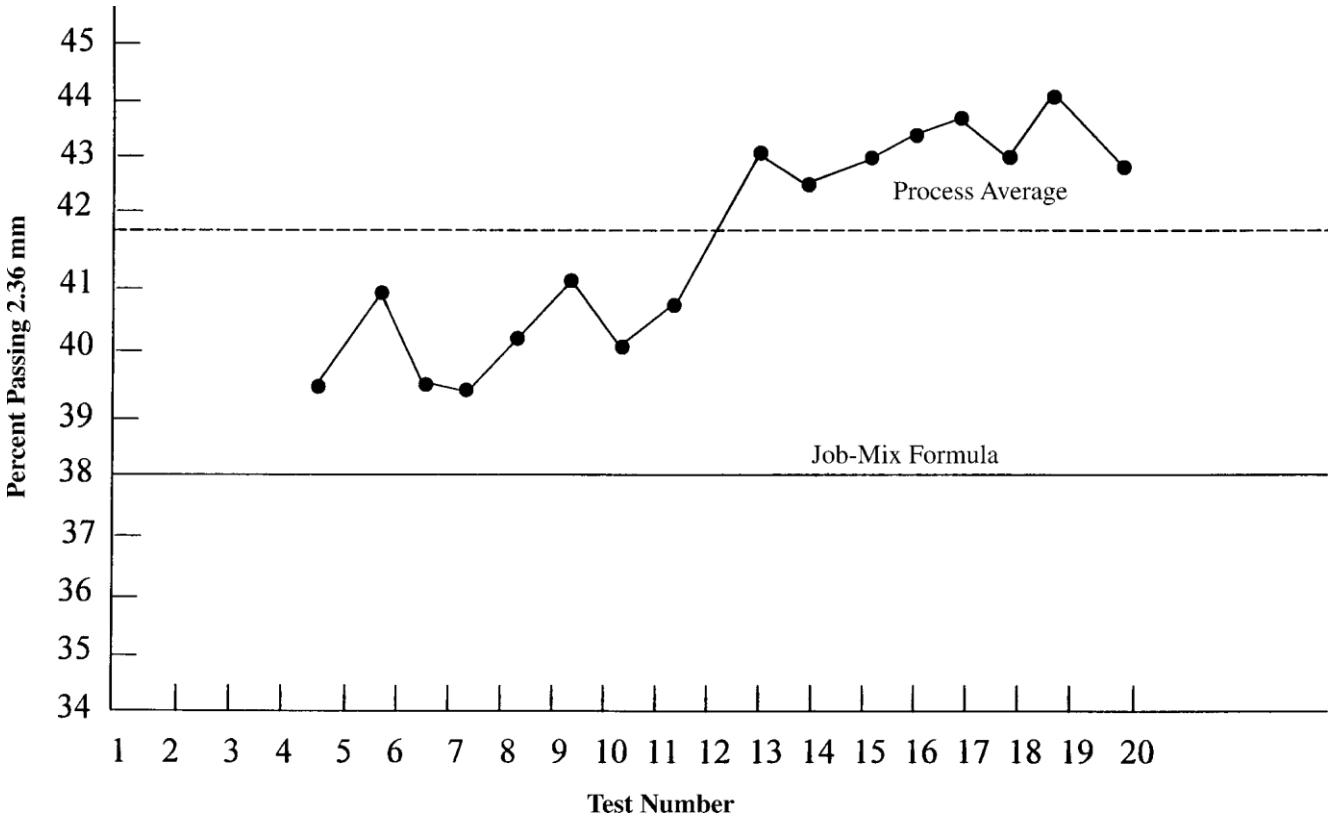


FIGURA 4-3 Promedio móvil de cinco mediciones, porcentaje que pasa el tamiz de 2.36 mm (No. 8) en la gradación de extracción.

La presencia de causas asignables puede deberse al funcionamiento incorrecto de uno o más equipos, muestreo y pruebas inadecuadas, o errores en el cálculo de los resultados. Si las mediciones realizadas en muestras de un proceso tienen un promedio constante y una desviación estándar constante (medida de variación), los límites que incluyen los valores extremos permanecerán a distancias fijas del promedio. En este caso, se dice que el proceso está en "control estadístico".

Este es el fundamento de los gráficos de control estadístico simples. En dichos gráficos, se traza una línea central que representa el valor promedio de las mediciones. Líneas límite, que representan la dispersión esperada de las mediciones debido a causas aleatorias, están igualmente espaciadas por encima y por debajo de la línea promedio. Se espera que las mediciones representadas en el gráfico sigan una distribución normal, con la mayoría de los puntos cerca de la línea central y casi todos dentro de los límites. La presencia de muchos puntos

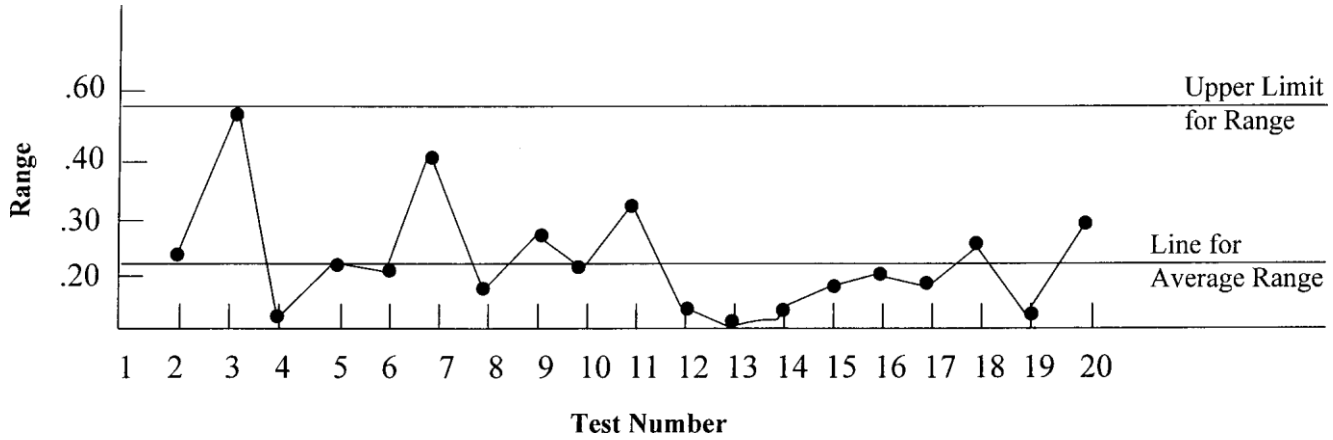


FIGURA 4-4 Rangos móviles de dos mediciones, contenido de asfalto en mezclas de pavimentación.

fuera de las líneas límite o demasiados puntos a un lado de la línea central indica la presencia de una causa asignable, un factor especifico y corregible, puede estar aumentando la variabilidad de las mediciones y sugiere que el proceso podría estar fuera de control. Si se encuentra y se determina la causa asignable, la dispersión de las mediciones se reduce y hay menos posibilidades de que las mediciones se ubiquen fuera de los límites especificados.

Las líneas de límite en los gráficos de control estadístico no son límites de especificación, sino herramientas para mantener la uniformidad del proceso. Cualquier punto fuera de estas líneas debe investigarse, y las condiciones en que ocurrieron mediciones extremas deben registrarse. Si todos los puntos permanecen dentro de las líneas, estas pueden extenderse, salvo cambios en el proceso.

Al igual que con los gráficos de medias y rangos móviles, se utilizan dos gráficos con el proceso de gráficos de control estadístico: *gráfico para promedios* y *para rangos*. La figura 4 y 5 proporciona ejemplos de esos gráficos. El trazado de puntos cerca o más allá de los límites de advertencia alerta al contratista de que una causa asignable puede estar actuando en el proceso HMA. El trazado de puntos cerca o más allá de las líneas de advertencia indica una posible causa asignable, mientras que los puntos más allá de las líneas de acción confirman su presencia.

El gráfico de promedios en la Figura 4-5 muestra una falta de control entre las muestras 28 y 40, probablemente debido a un cambio en materiales o proporciones, lo que incrementó los vacíos de aire. En la práctica, se debería haber tomado acción inmediata al registrar el resultado de la prueba 28 y revisar los resultados de las muestras 44 y 76 para detectar errores.

El gráfico de rangos, sin embargo, muestra un control satisfactorio de la variación causada por el muestreo y las pruebas. Los gráficos de control estadístico son menos útiles en trabajos pequeños con pocas mediciones, pero son ideales en proyectos grandes que usan grandes volúmenes de mezcla producidos durante un periodo prolongado, permitiendo identificar y corregir causas asignables. Cabe señalar que estos gráficos indican cuándo buscar problemas, pero no especifican dónde ni cuál es la causa, lo cual es responsabilidad del contratista.

Un programa de aceptación define un conjunto de procedimientos racionales que deben ser utilizados por la agencia para determinar el grado de cumplimiento de los requisitos del contrato y el valor del producto entregado por el contratista. La intención es utilizar la mayor cantidad de información posible para hacer esta determinación. Los resultados de las pruebas de aceptación de la agencia y sus actividades de inspección continuas forman el corazón del programa. La validación de los resultados de las pruebas de los contratistas debe lograrse a través de una comparación estadísticamente válida con los resultados de las pruebas de la agencia. La agencia también puede confiar en las pruebas o certificaciones de los proveedores para la aceptación de algunos artículos. Todas las personas que participen directamente en las actividades de aceptación deben estar cualificadas para las responsabilidades que se les asignen. Sólo los laboratorios calificados deben realizar las pruebas requeridas.

El objetivo de cualquier programa de aceptación es determinar el grado de cumplimiento de los requisitos del contrato y el valor de un producto.

Las especificaciones de CC/AC suelen contener un plan de aceptación que identifica un método para tomar y realizar mediciones en una muestra con el fin de determinar la aceptabilidad de un lote de producción y construcción de HMA. El plan de aceptación suele contener lo siguiente:

- Método de prueba y punto de muestreo,
- Tamaño del lote,
- Tamaño de la muestra,
- Límites de aceptación,
- Método de evaluación,
- Riesgos asociados con especificación,
- Curva características funcionamiento,
- Sistema de ajuste de bonos/precios.

Un *lote* es la cantidad de producto evaluada como aceptable o inaceptable según una muestra con un número fijo de pruebas. Determinar el tamaño adecuado del lote es una decisión económica, ya que un lote muy grande (como un proyecto completo) o muy pequeño (como una carga de material) puede hacer que los costos de prueba superen los beneficios.

Actividades de pruebas de aceptación de agencias

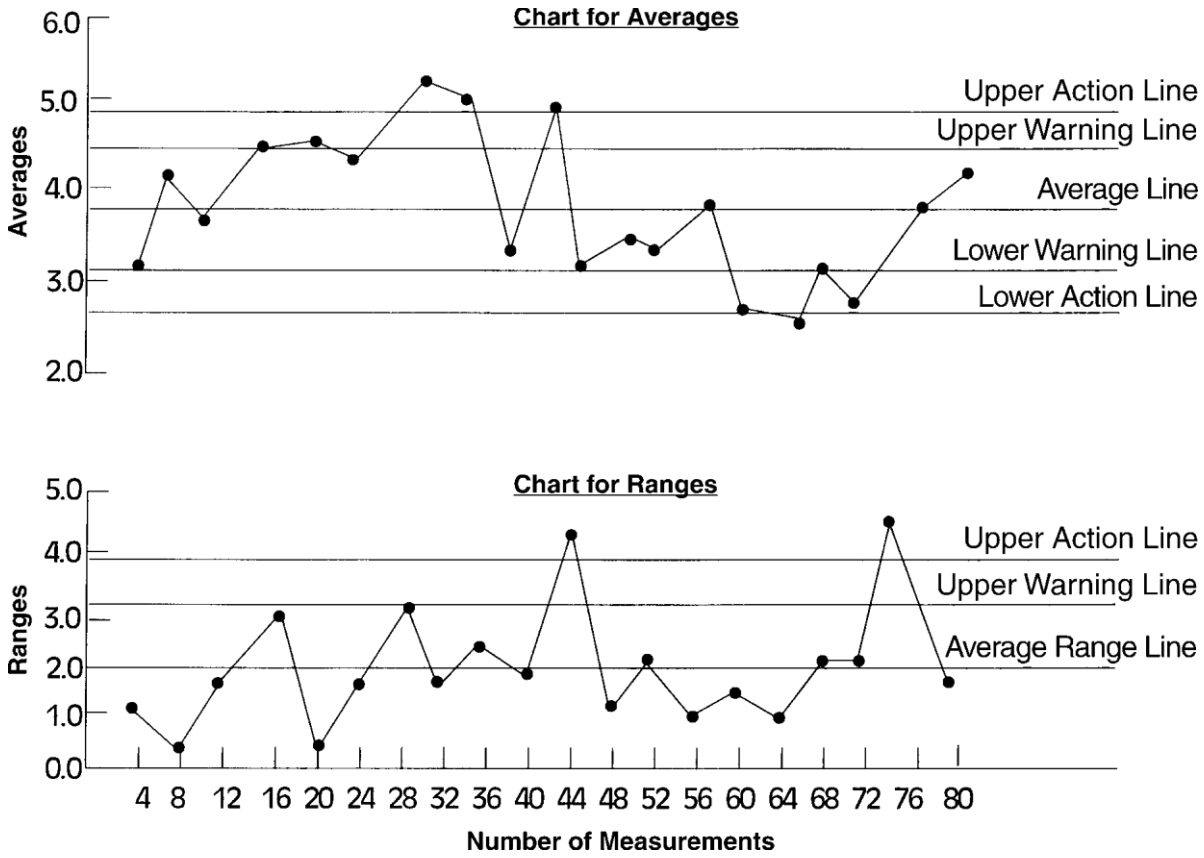


FIGURA 4-5 Gráficos de control estadístico de promedio y rango para vacíos de aire (cuatro mediciones).

El *método de prueba* y el *punto de muestreo*, elementos que influyen significativamente en la variabilidad, deben definirse en las especificaciones del contrato. Una vez más, la variabilidad a menudo está influenciada por el punto de muestreo. Ambos elementos deben ser los mismos que los utilizados para establecer los límites de aceptación de la especificación.

El número de especímenes que componen la muestra tomada para juzgar la conformidad de un lote a menudo se denomina *tamaño de la muestra*. Esto no debe confundirse con la cantidad de material (tamaño de la muestra) para la prueba. En la mayoría de las especificaciones de QA, el tamaño de la muestra oscila entre 3 y 5.

Los límites de aceptación, parte central del plan de aceptación, se definen con base en criterios estadísticos que identifican materiales aceptables y rechazables. La definición de material aceptable debe referirse al material que proporcionará un servicio satisfactorio. vicio cuando se utilice para el propósito previsto. Lo que constituye un material aceptable a menudo se determina sobre la base de lo que ha funcionado bien en el pasado. El nivel en el que el material se considera aceptable se conoce como nivel de *calidad aceptable*. Debe tener una baja probabilidad de ser aceptada o será aceptada sólo bajo las condiciones de un calendario de pagos reducido. El nivel en el que el material se considera inaceptable y requiere ser retirado y reemplazado se conoce como nivel de *calidad rechazable*.

El método de evaluación para la aceptación, la aceptación a precio reducido o el rechazo del material HMA se basa generalmente en el *porcentaje de material dentro de los límites de especificación* (PWL) o el *porcentaje defectuoso* (PD). La figura 4-6 ilustra la relación entre PWL y DP. Con una especificación PWL, el porcentaje de defectuosos y el porcentaje dentro de los límites son complementarios; En otras palabras, el porcentaje de defectuosos más el porcentaje dentro de los límites es igual al 100 por ciento. Ambos se basan en el área debajo de la curva en forma de campana. El nivel de calidad aceptable

generalmente se establece en 90 PWL, mientras que materiales con 70 PWL o menos suelen ser rechazados. Se aplican reducciones proporcionales entre estos niveles.

Dos tipos de *riesgos* están asociados con las especificaciones de QC/QA: el del contratista y el de la agencia. El riesgo del contra- tractor es la probabilidad de rechazo de un lote de material cuando el lote es aceptable. El riesgo de la agencia es la probabilidad de aceptar un lote cuando el lote es inaceptable. Estos riesgos existen como resultado de la ubicación de los límites de especificación. El poder de las especificaciones de QC/QA es que los dos riesgos son cuantificables.

Las curvas de características operativas ilustran los riesgos asociados con varios niveles de calidad. Estas curvas para una especificación son extremadamente importantes porque indican cómo se relacionan los riesgos entre sí y con varios tamaños de muestra y poblaciones. Las curvas de características operativas deben desarrollarse para todas las especificaciones antes de que se implementen y deben actualizarse para reflejar cualquier cambio en los límites o procedimientos de aceptación.

Un último requisito con las especificaciones de control de calidad / control de calidad es la decisión sobre cómo abordar el material que no cumple con las especificaciones. La corrección o remoción de material y el cierre de la planta son dos métodos utilizados tradicionalmente. Estos métodos son costosos y no proporcionan incentivos positivos para mantener el proceso bajo control. Se han empleado ajustes de precios tanto negativos como positivos. El estado del arte

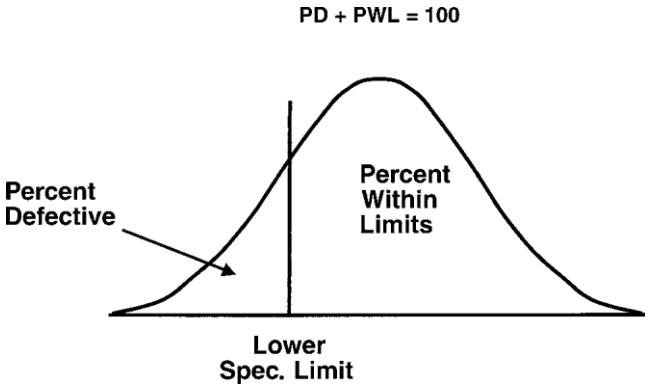


FIGURA 4-6 Relación entre el porcentaje dentro de los límites y el porcentaje de defectuosos.

La filosofía del ajuste de precios es que el precio debe ajustarse para que sea proporcional al rendimiento estimado del producto. Si se estima que el rendimiento se verá afectado negativamente en un 10 por ciento, el ajuste de precio debe estipular que el producto se pague al 90 por ciento del precio de oferta. Del mismo modo, si el rendimiento estimado es mejor que el especificado, algunas agencias permiten un ajuste de precio positivo (bonificación).

RESUMEN

Por lo general, se utilizan dos tipos de especificaciones para controlar la producción de HMA: el método y el control de calidad/aseguramiento de la calidad. Las especificaciones de los métodos han servido bien a la industria en el pasado, pero el enfoque de QC/QA da como resultado un mejor control general.

Los conceptos estadísticos se están utilizando ampliamente con las especificaciones de QC/QA en el control de HMA. Se deben tomar muestras aleatorias para que los conceptos estadísticos sean válidos. Los factores de remuneración de escala móvil se utilizan a menudo con enfoques estadísticos. Estos factores de pago de escala móvil permiten que el contratista reciba un incentivo por un trabajo de muy alta calidad, un pago del 100 por ciento por un trabajo aceptable y un desincentivo por un trabajo que es menos que deseable pero que aun así es marginalmente aceptable.

Con las especificaciones de control de calidad/aseguramiento, se requiere que el contratista realice las pruebas de control de calidad, y la agencia propietaria es responsable del control de calidad. Cada vez más estados están comenzando a utilizar especificaciones de QC/QA basadas en conceptos estadísticos con factores de pago de escala móvil.

REFERENCIAS

1. Cominsky, R. J., B. M. Killingsworth, R. M. Anderson, D. A. Anderson y W. W. Crockford. *Informe 409 de NCHRP: Control de calidad y aceptación de asfalto de mezcla caliente diseñado en superpavimento*. Junta de Investigación del Transporte, Consejo Nacional de Investigación, Washington, D.C., 1998.
2. *Control de calidad para operaciones de plantas de mezcla en caliente y pavimentaciones*. QIP-97. Asociación Nacional de Pavimentos de Asfalto, Lanham, Maryland, 1997

PARTE I

Operaciones de Plantas de Mezcla Asfáltica en Caliente

SECCIÓN

5 Tipos de Plantas de Asfalto: Visión General

El objetivo principal de una planta de Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA) es combinar agregados y cemento asfáltico a altas temperaturas para obtener una mezcla homogénea destinada a la pavimentación. Los agregados empleados pueden ser de un solo tipo, como los provenientes de una trituradora o de una cantera, o bien una combinación de agregados gruesos y finos, con o sin filler mineral. El ligante utilizado es generalmente cemento asfáltico, aunque también pueden emplearse emulsiones asfálticas o modificadores. Además, se pueden incorporar diversos aditivos, tanto líquidos como en polvo, a la mezcla. De hecho, con la tecnología Superpave, el uso de aditivos es cada vez más frecuente. Este incremento en el uso de aditivos conlleva la necesidad de contar con más tanques de almacenamiento para el ligante, así como silos para los materiales minerales.

Existen tres tipos fundamentales de plantas de HMA en uso en Estados Unidos: por lotes, de tambor continuo de flujo paralelo y de tambor continuo de flujo contracorriente. Aunque los tres tipos comparten el mismo objetivo final, sus procesos operativos y el flujo de materiales presentan diferencias, las cuales se detallarán en las siguientes secciones.

PLANTAS POR LOTES

Una planta de lotes produce mezclas asfálticas mediante un proceso que involucra un sistema de alimentación en frío, suministro de cemento asfáltico, secado de agregados, mezcla en torre y control de emisiones atmosféricas. La torre de la planta, como se observa en la Figura 5-2, consta de un elevador, cribas, tolvas, pesaje y un mezclador pugmill. El flujo de materiales en este proceso se detalla en la Figura 5-3.

El agregado utilizado en la mezcla se extrae de las pilas de almacenamiento y se coloca en tolvas de alimentación en frío individuales. Los agregados de diferentes tamaños se dosifican fuera de sus tolvas mediante una combinación del tamaño de la abertura de la compuerta en la parte inferior de cada tolva y la velocidad de la cinta transportadora debajo de la tolva. Generalmente, una cinta transportadora debajo de cada tolva deposita el agregado en una cinta transportadora de recolección ubicada debajo de todas las tolvas de alimentación en frío.

El agregado se transporta a lo largo de la cinta transportadora de recolección hasta la entrada del secador rotatorio. El proceso de calentamiento y secado se mueve hacia el extremo superior del secador, en contra del flujo del agregado. A medida que el agregado se revuelve a través de los gases de escape, el material se calienta y se seca. La humedad se elimina y se arrastra fuera del secador como parte de la corriente de gas de escape. El agregado caliente y seco se descarga por el extremo inferior del secador.

El agregado caliente generalmente se transporta a la parte superior de la torre de mezcla de la planta mediante un elevador de cangilones. Al descargarse del elevador, el agregado normalmente pasa a través de un conjunto de cribas vibratorias hacía, típicamente, una de las cuatro tolvas de almacenamiento caliente. El material de agregado más fino pasa directamente a través de todas las cribas hacia la tolva caliente No. 1; las partículas de agregado más gruesas se separan mediante las cribas de diferentes tamaños y se depositan en una de las otras tolvas calientes. La separación del agregado en las tolvas calientes depende del tamaño de las aberturas en la criba que se utiliza en la criba vibratoria y de la gradación del agregado en las tolvas de alimentación en frío.

El agregado calentado, secado y redimensionado se mantiene en las tolvas calientes hasta que se descarga desde una compuerta en la parte inferior de cada tolva hacia una tolva de pesaje. La proporción correcta de cada agregado se determina por peso.

Al mismo tiempo que se dosifica y pesa el agregado, el cemento asfáltico se bombea desde su tanque de almacenamiento a un balde de pesaje calentado separado ubicado en la torre justo encima de mezclador de ejes gemelos (pugmill). La cantidad adecuada de material se pesa en el balde y se mantiene hasta que se vacía en el mezclador de ejes gemelos.

El agregado en la tolva de pesaje se vacía en un mezclador de ejes gemelos, y las diferentes fracciones de agregado se mezclan juntas durante un período de tiempo muy corto, generalmente menos de 5 segundos. El agregado en la tolva de pesaje se vacía en un mezclador de ejes gemelos, y las diferentes fracciones de agregado se mezclan juntas durante un período de tiempo muy corto, generalmente menos de 5 segundos.

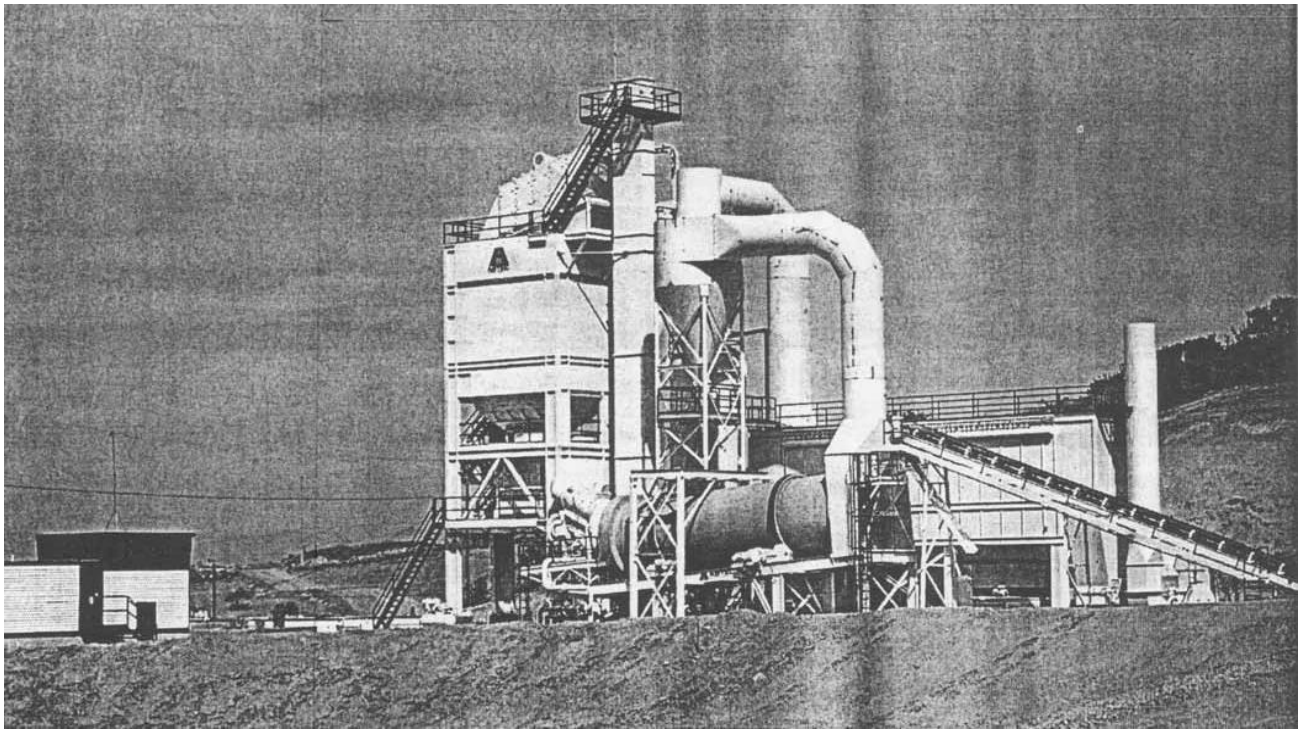


FIGURA 5-1 Planta típica de mezcla asfáltica en caliente (HMA)

Después de este breve tiempo de mezcla en seco, el cemento asfáltico del balde de pesaje se descarga en el mezclador de ejes gemelos, y comienza el tiempo de mezcla húmeda. El tiempo de mezcla para la mezcla del cemento asfáltico con el agregado no debe ser mayor que el necesario para recubrir completamente las partículas de agregado con una delgada película de material de cemento asfáltico, generalmente en el rango de 25 a 35 segundos, siendo el extremo inferior de este rango para un mezclador de ejes gemelos que esté en buenas condiciones. El tamaño del lote mezclado en el mezclador de ejes gemelos puede estar en el rango de 1,81 a 5,44 toneladas (2 a 6 toneladas).

Cuando se completa la mezcla, se abren las compuertas en la parte inferior del mezclador de ejes gemelos y la mezcla se descarga en el vehículo de transporte o en un dispositivo de transporte que lleva la mezcla a un silo desde el cual se cargarán los camiones por lotes. Para la mayoría de las plantas de lotes, el tiempo necesario para abrir las compuertas del mezclador de ejes gemelos y descargar la mezcla es de aproximadamente 5 a 7 segundos. El tiempo total de mezcla (tiempo de mezcla en seco + tiempo de mezcla húmeda + tiempo de descarga de la mezcla) para un lote puede ser tan corto como 30 segundos, pero típicamente, el tiempo total de mezcla es de aproximadamente 35 segundos.

La planta está equipada con dispositivos de control de emisiones atmosféricas, que comprenden sistemas de recolección primarios y secundarios (ver Sección 12). Un colector seco o caja de decantación se utiliza normalmente como colector primario. Ya sea un sistema de depurador húmedo o, más comúnmente, un sistema de filtro de tela seco (filtro de bolsa) puede utilizarse como sistema de recolección secundario para eliminar las partículas de los gases de escape que fluyen fuera del secador y enviar aire limpio a la atmósfera a través de la chimenea.

Si se incorpora RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) a la mezcla, se coloca en una tolva de alimentación en frío separada desde la cual se entrega a la planta. El RAP se puede agregar al nuevo agregado en uno de tres lugares: la parte inferior del elevador caliente; las tolvas calientes; o, más comúnmente, la tolva de pesaje. La transferencia de calor entre el nuevo agregado sobrecalentado y el material reciclado comienza tan pronto como los dos materiales entran en contacto y continúa durante el proceso de mezcla en el mezclador de ejes gemelos.

PLANTAS DE TAMBOR DE FLUJO PARALELO

La planta de mezcla en tambor de flujo paralelo es una variación de la planta de mezcla continua de estilo antiguo. Consiste en cinco componentes principales: el sistema de alimentación en frío, el suministro de cemento asfáltico

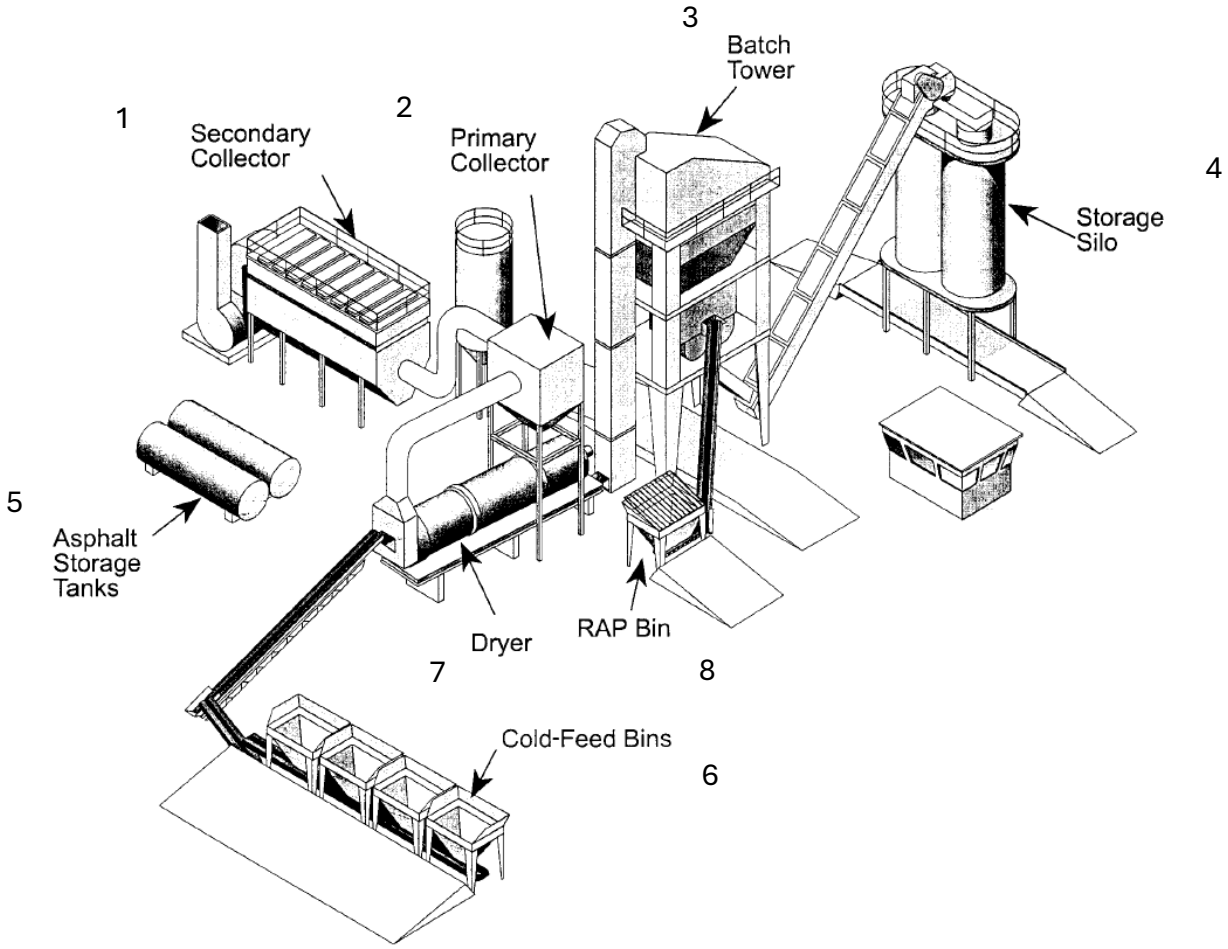


FIGURA 5-2: Principales componentes de una planta por lotes.

1.Colector secundario, 2. Colector primario, 3. Torre de dosificación por lotes, 4. HMA fabricado de manera continua, 5. Tanques de almacenamiento de asfalto, 6. Tolvas de alimentación en frío, 7. Secador, 8. Contenedor de Asfalto Recuperado

sistema de capas, mezclador de tambor, silos de almacenamiento o acumulación (consulta la Sección 11 para las definiciones de estos tipos de silos) y equipo de control de emisiones.

Una planta típica de mezcla de tambor de flujo paralelo se representa en la Figura 5-4; los principales componentes de la planta se muestran en la Figura 5-5.

Las tolvas de alimentación en frío se utilizan para dosificar el material en la planta. Debajo de cada contenedor, se emplea una banda alimentadora de velocidad variable. La cantidad de agregado extraído de cada contenedor puede controlarse tanto por el tamaño de la abertura de la compuerta como por la velocidad de la banda alimentadora, lo que permite una entrega precisa de los materiales de diferentes tamaños.

El agregado en cada banda alimentadora se deposita en una cinta transportadora de recolección que se encuentra debajo de todos lo de alimentación en frío. El material combinado normalmente pasa a través de una criba de desbaste y luego se transfiere a una cinta de carga para su transporte al mezclador de tambor.

La cinta transportadora de carga está equipada con dos dispositivos que se utilizan para determinar la cantidad de agregado que se entrega a la planta: un puente de pesaje debajo de la cinta transportadora mide el peso del agregado que pasa sobre él, y un sensor determina la velocidad de la cinta. Estos dos valores se utilizan para calcular el peso húmedo del agregado, en toneladas por hora, que entra al mezclador de tambor.

El computador de la planta, con el contenido de humedad del agregado proporcionado como un valor de entrada, convierte el peso húmedo en peso seco para determinar la cantidad correcta de cemento asfáltico necesaria en la mezcla.

El mezclador de tambor convencional es un sistema de flujo paralelo, donde los gases de escape y el agregado se mueven en la misma dirección. El quemador está ubicado en el extremo superior del tambor (extremo de entrada del agregado). El agregado ingresa al tambor ya sea desde un canal inclinado situado encima

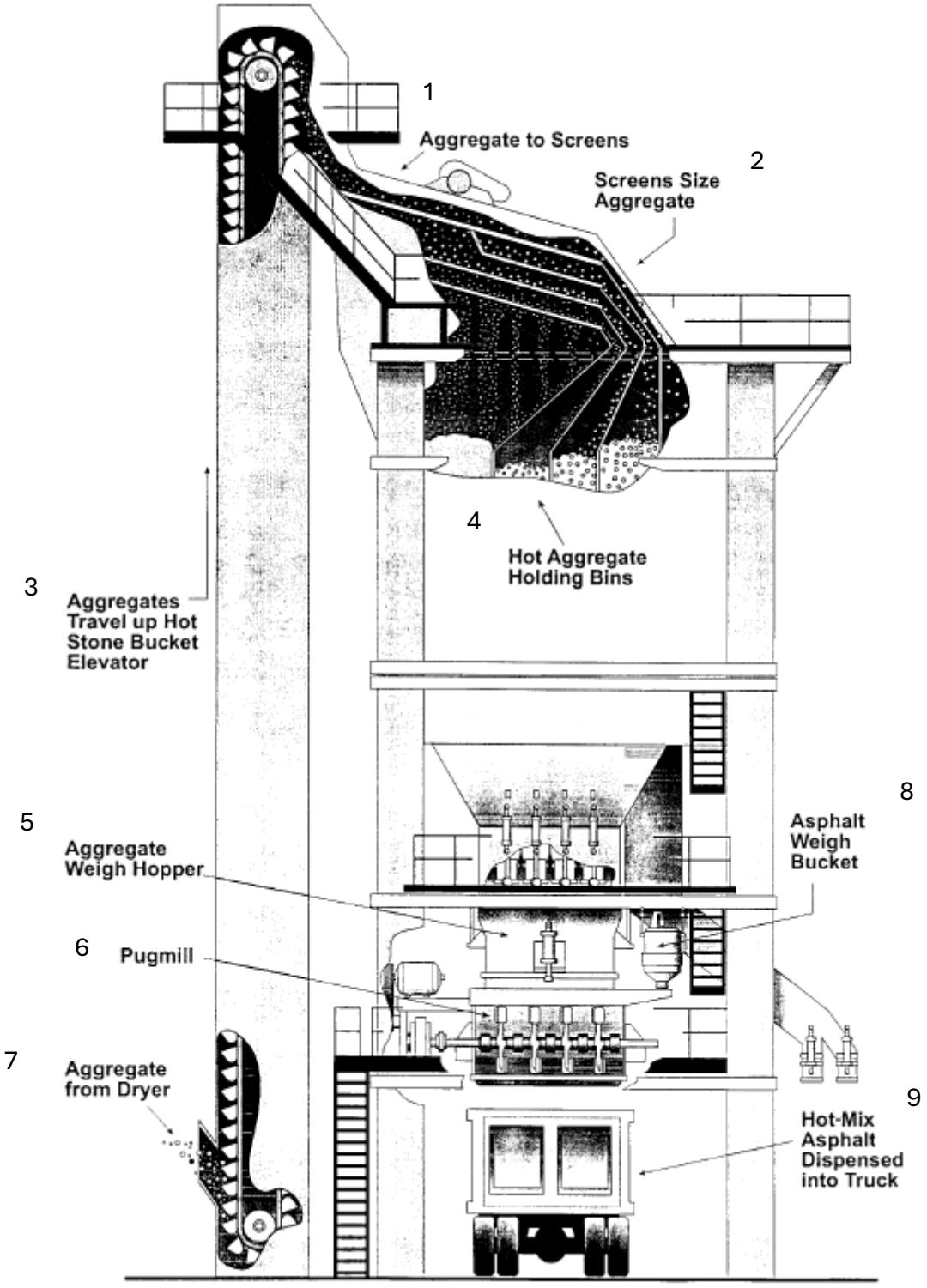


FIGURA 5-3: Flujo de materiales en una torre de dosificación.

1. Agregado a las cribas, 2. Tamaño de las cribas del agregado, 3. Los agregados suben por el elevador de cangilones de piedra caliente, 4. Contenedores de almacenamiento de agregado caliente, 5. Balanza de pesaje de agregados, 6. Pugmil, 7. Agregado del secador, 8. Cubo de pesaje de asfalto, 9. Asfalto en mezcla caliente dispensado en camión

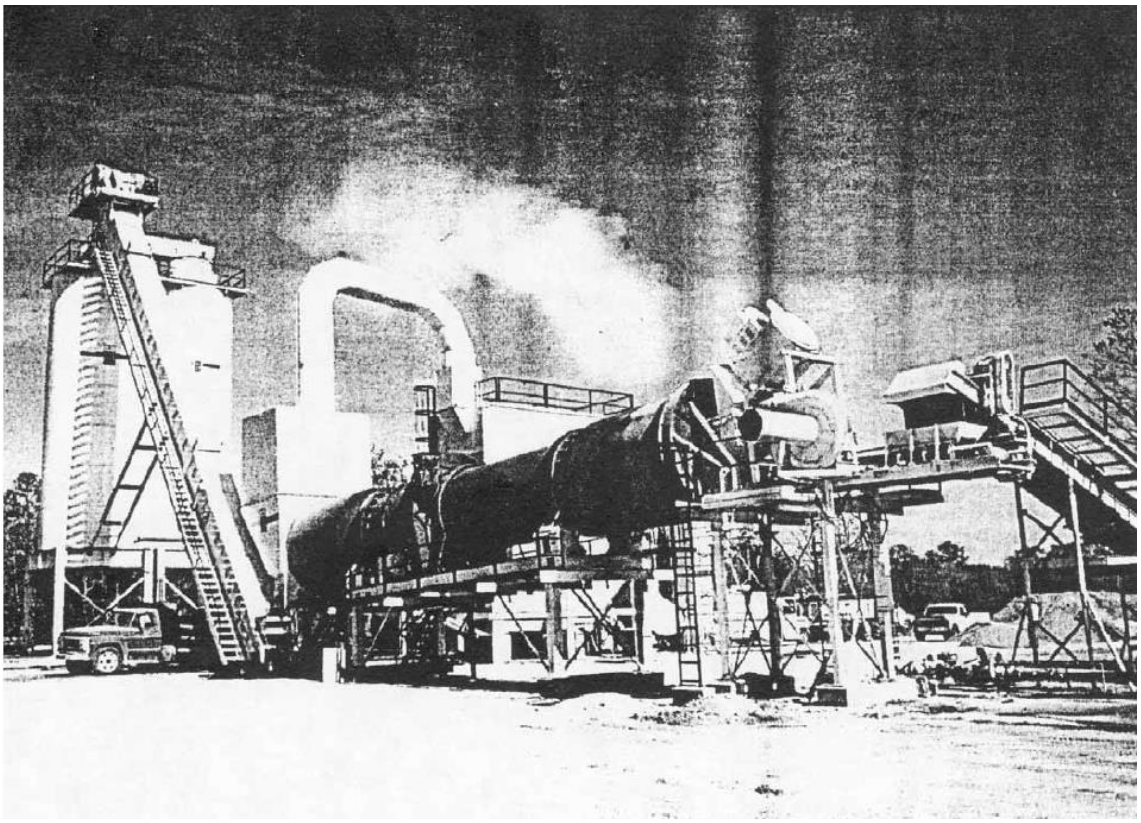


FIGURA 5-4: Planta típica de mezcla en tambor de flujo paralelo para Mezcla Asfáltica en Caliente.

El quemador está ubicado en el extremo superior del tambor o sobre una cinta slinger debajo del quemador. El agregado se desplaza hacia abajo en el tambor gracias a una combinación de gravedad y la configuración de las paletas ubicadas dentro del tambor. A medida que avanza, el agregado se calienta y se elimina la humedad. Se forma un denso velo de agregado cerca del punto medio del tambor para facilitar la transferencia de calor.

Si se añade RAP (Pavimento Asfaltico Recuperado) al agregado nuevo, este se deposita desde su propio tolva de alimentación en frío y sistema de cintas transportadoras de recolección/carga en una entrada situada cerca del centro del tambor (sistema de alimentación dividida). En este proceso, el material recuperado está protegido de los gases de escape a alta temperatura por el velo de agregado nuevo ubicado antes del punto de entrada del RAP.

Cuando se usan mezclas con un alto contenido de RAP, es más probable que este material se sobrecaliente durante el proceso. Esto podría resultar en la emisión de humo desde el tambor o en daños al RAP.

El agregado nuevo y el material recuperado, si se utiliza, avanzan juntos hacia la parte trasera del tambor. El cemento asfáltico es extraído del tanque de almacenamiento mediante una bomba alimentada a través de un medidor, donde se determina el volumen adecuado de cemento asfáltico. El material ligante se entrega luego a través de una tubería hacia la parte trasera del tambor mezclador, donde el cemento asfáltico se inyecta sobre el agregado. El recubrimiento del agregado ocurre mientras los materiales se mezclan y avanzan hacia el extremo de descarga del tambor.

El relleno mineral o los finos del sistema de filtración (o ambos) también se agregan en la parte trasera del tambor, ya sea justo antes o junto con la adición del cemento asfáltico. La mezcla asfáltica se deposita en un dispositivo de transporte (como un transportador de rastras, una cinta transportadora o un elevador de cangilones) para su traslado a un silo de almacenamiento. El silo convierte el flujo continuo de la mezcla en un flujo por lotes para su descarga en el vehículo de transporte.

En general, el mismo tipo de equipo de control de emisiones se utiliza tanto en las plantas de mezcla en tambor como en las de dosificación por lotes. Se puede emplear un colector seco primario y un sistema de depuración húmeda o un colector secundario tipo filtro de mangas. Si se utiliza un sistema de depuración húmeda, los finos recolectados no pueden reciclarse nuevamente en la mezcla y se desperdician. Si se usa un filtro de mangas

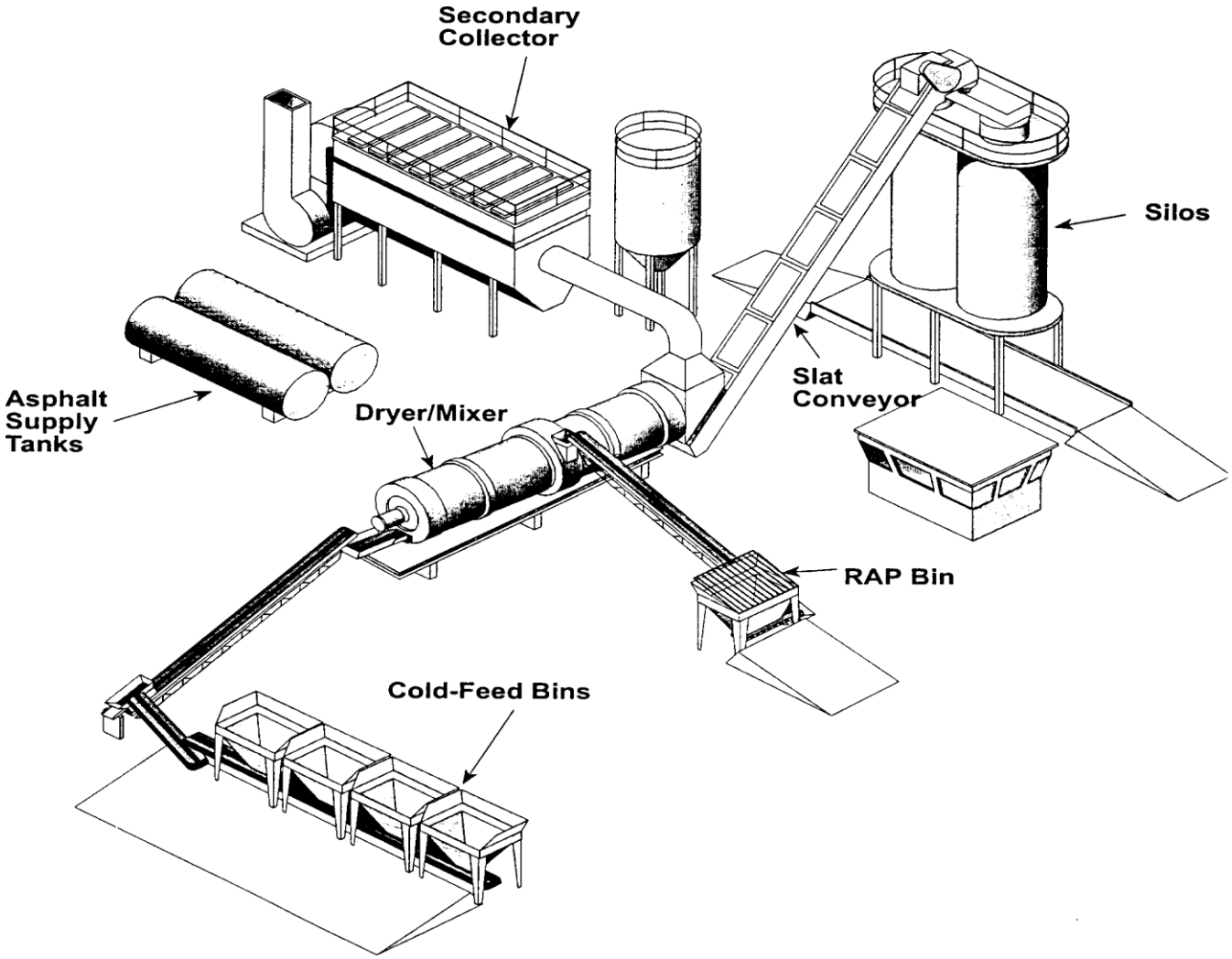


FIGURA 5-5 Componentes principales de una planta de mezcla de tambor de flujo paralelo.

Loa finos recogidos pueden devolverse total o parcialmente al tambor mezclador o pueden desperdiciarse.

A finales de la década de 1980, se introdujeron en la industria del HMA una serie de variaciones de la planta convencional de mezcla de tambor de flujo paralelo. Una deellas es la planta de recubrimiento. En este tipo de mezcladora de tambor, el tubo de inyección de cemento asfáltico se retira del tambor. Esta modificación elimina la exposición del cemento asfáltico a los gases de escape aalta temperatura y reduce tanto las emisiones de hidrocarburos como las emisiones visibles de la planta. El árido no revestido, que se calienta y seca en el interior de la mezcladora de asfalto, se seca en el interior de la mezcladora de asfalto.

La mezcla del cemento asfáltico y el aglomerado tiene lugar a medida que los materiales se desplazan de un extremo a otro de la unidad de mezcla. La mezcla del cemento asfáltico y el árido tiene lugar a medida que los materiales se desplazan de un extremo a otro de la unidad de mezcla. Una vez finalizada la mezcla, el material se entrega al dispositivo de transporte utilizado para transportarlo al silo. La figura 5-6 muestra el tipo de planta de tambor mezclador con revestidor. Debido a que el número de plantas de tambor-mezclador de flujo paralelo en uso es actualmente limitado, este tipo de planta no se trata con más detalle en este manual.

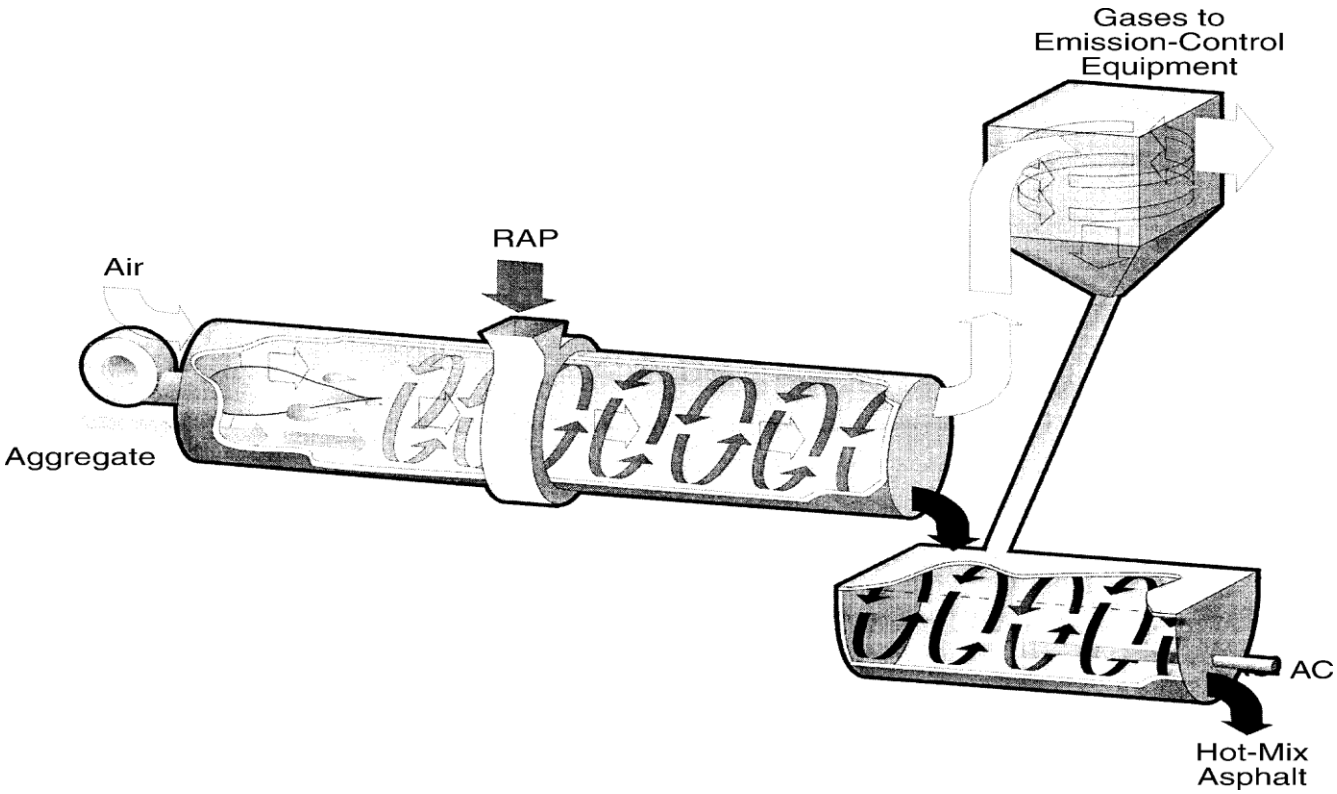


FIGURA 5-6 Planta de mezcla de tambor con recubridora.

INSTALACIONES MEZCLADORAS DE TAMBOR DE CONTRACORRIENTE

Un desarrollo más reciente en el diseño de plantas de mezcla con tambor es la planta de mezcla con tambor de flujo contrario. Su diseño representa un esfuerzo por mejorar el proceso de transferencia de calor en el interior del tambor y reducir las emisiones de la planta. En esta planta, el calentamiento y el secado del árido se realizan de forma similar a la de un secador convencional de planta discontinua.

Existen dos tipos básicos de plantas de mezcla de tambor de flujo contrario. La primera, mostrada en la Figura 5-7, tiene la unidad de mezclado extendida en el extremo de la porción del secador de áridos del tambor. El segundo, mostrado en la Figura 5-8, tiene la unidad de mezcla doblada hacia atrás alrededor de la parte del secador de áridos del tambor. Con ambos diseños, el árido entra en el tambor por el extremo superior. El quemador, sin embargo, está situado cerca del extremo inferior del tambor, de forma similar a su posición en un secador de áridos.

secadora de planta por lotes. Los áridos descienden por el tambor a contracorriente de los gases de escape. No se introduce cemento asfáltico en el árido dentro de la parte principal (secado) del tambor. La mezcla del material ligante con el árido calentado y secado se realiza completamente fuera de la corriente de gases de escape, detrás o debajo del quemador.

En el diseño de planta de mezcla de tambor a contracorriente que se muestra en la Figura 5-7, el árido caliente pasa por el quemador a una zona de mezcla. En el extremo superior de la zona de mezclado, los finos del filtro de mangas o el relleno mineral (o ambos) se añaden al árido. Poco después, se introduce el material ligante en el tambor. La mezcla del árido y el cemento asfáltico tiene lugar detrás (corriente abajo) del secador en una zona de mezcla separada, fuera del contacto con los gases de escape del quemador. Si se utiliza RAP en la mezcla asfáltica, se introduce en el tambor

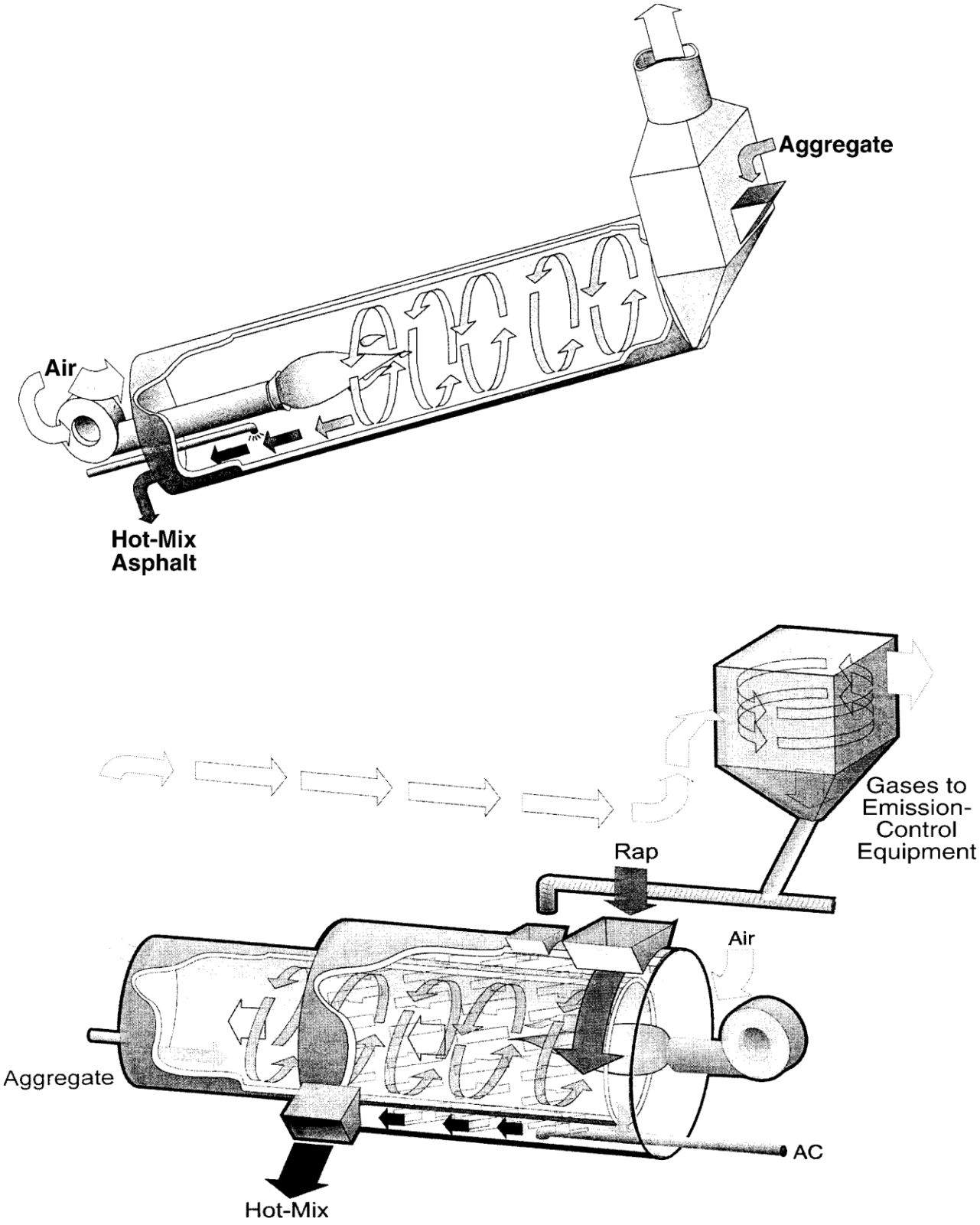


FIGURA 5-8 Mezcladora de tambor de contracorriente con unidad de mezcla plegada alrededor del secador de áridos.

aguas abajo (detrás) del quemador. De este modo, el material reciclado tampoco entra en contacto con los gases de escape a alta temperatura del quemador y se reducen las emisiones visibles de hidrocarburos. El material recuperado se calienta sobrecalentando el árido nuevo en el extremo superior del secador de contracorriente y mezclando los dos materiales en la parte inferior del tambor, entre el quemador y el extremo de descarga de la unidad de mezcla.

En el diseño de planta de mezcla de tambor de flujo contrario que se muestra en la Figura 5-8, el tambor interior actúa como secador de áridos y el tambor exterior sirve como unidad de mezcla. El cemento asfáltico se introduce en el árido después de que éste haya sido descargado del tambor interior al exterior. La mezcla de los dos materiales se produce a medida que el árido y el cemento asfáltico son transportados cuesta arriba en el tambor exterior por un conjunto de paletas mezcladoras fijadas al tambor interior. El tambor interior gira, mientras que el exterior permanece inmóvil. Este tipo de planta de mezcla de tambor a contracorriente se conoce comercialmente como planta de doble tambor debido a la configuración de doble tambor. En el proceso de doble tambor, entre los tambores interior y exterior, entra en el tambor cualquier material de relleno mineral o finos del filtro de mangas, así como material RAP. Así, como en el diseño mostrado en la Figura 5-7, el material se mantiene alejado de los gases de escape del quemador. En particular, esto protege al RAP del contacto con los gases de escape de alta temperatura y, por lo tanto, reduce la posibilidad de que se generen emisiones visibles durante el proceso de reciclado

6 Almacenamiento y manipulación de áridos

El almacenamiento y la manipulación tanto de áridos nuevos como de material RAP para su uso en cualquier tipo de planta de asfalto se tratan en esta sección. En primer lugar, se tratan las técnicas adecuadas de acopio, tanto para la colocación del árido en la pila como para la retirada del árido de la pila. A continuación se revisa la descarga del árido desde los silos de alimentación en frío a las cintas alimentadoras individuales; el paso del árido a la cinta transportadora de acopio; y la entrega del árido, a veces a través de una criba de separación, a la cinta transportadora de carga y, finalmente, al secador o mezclador de tambor de la planta por lotes. También se aborda el uso de un sistema de báscula puente en el transportador de carga de una planta de mezcla de tambor para determinar la cantidad de árido que se introduce en el tambor. A continuación, se presenta un análisis de la entrega de RAP desde su depósito de alimentación en frío a la planta de mezclado por lotes o de tambor. Tras un breve repaso de la adición de cal hidratada para reducir los daños causados por la humedad en la mezcla de HMA, se aborda la calibración del sistema de alimentación en frío, incluidos los medios adecuados para comprobar la velocidad de suministro de áridos desde los depósitos individuales de alimentación en frío y a través del sistema de báscula puente. La última subsección resume los factores operativos clave que deben tenerse en cuenta al supervisar el almacenamiento y la manipulación de nuevos áridos y RAP.

RESERVAS DE ÁRIDOS

El control de calidad de la HMA, independientemente de si se utiliza una planta de mezclado por lotes o de tambor para fabricar la mezcla, comienza con los acopios de áridos que se procesarán a través de la planta y se incorporarán a la mezcla. Los áridos deben almacenarse en una superficie inclinada, limpia y estable, manteniendo separados los diferentes tamaños de áridos gruesos y finos. Se debe tener cuidado durante los procesos de acopio y retirada para minimizar la segregación del árido en cada pila. (La segregación es la separación no deseable del árido mezclado en zonas con una gradación inadecuada). Si se produce la segregación de un tamaño concreto de árido grueso o fino, debe hacerse un esfuerzo para mezclar los materiales segregados antes de que el árido se entregue en los silos de alimentación en frío. Sin embargo, esto es difícil de hacer y hay que tener cuidado. con esta operación para no agravar el problema de la segregación.

Construir reservas

Los áridos deberán acopiarse sobre una superficie limpia, seca y estable, y no deberá permitirse que se contaminen con materiales extraños como polvo, barro o hierba. El polvo fugitivo en la zona de acopio de áridos deberá controlarse de forma que el polvo no cubra la superficie de los áridos y, por tanto, no altere la gradación del material en cada acopio. Los acopios deberán construirse de forma que drenen libremente para garantizar que el contenido de humedad de los áridos sea lo más bajo posible. Se utilizarán plataformas pavimentadas para facilitar el drenaje y proporcionar una plataforma de trabajo sólida. El exceso de humedad, especialmente en los áridos finos (arena), aumenta el coste de secado de los áridos y reduce la capacidad de producción de la planta. Cuando se utilice una planta de mezcla de tambor, el contenido de humedad de cada tamaño de árido debe determinarse al menos dos veces al día y el contenido medio de humedad de los áridos combinados debe introducirse en el sistema informático de la planta.

Para reducir la cantidad de humedad que se acumula en los áridos, especialmente por la lluvia, suele ser rentable cubrir los acopios de áridos. La cubierta suele adoptar la forma de un tejado o un cobertizo, como se muestra en la Figura 6-1. Una lona colocada directamente sobre el árido no debe, por lo general, colocarse sobre la capa superior de árido. Una lona colocada directamente sobre el árido no debe utilizarse, ya que la humedad se acumula bajo la lona en lugar de evaporarse. Si sólo se utiliza un techo, debe colocarse encima de la pila de áridos finos, ya que este material tendrá normalmente un contenido de humedad más alto que el de los áridos más gruesos. Si se utiliza una segunda cubierta, deberá colocarse sobre el RAP ya que el contenido de humedad de este material afectará directamente la temperatura de la mezcla reciclada. Si se dispone de varias cubiertas, éstas deberán colocarse sobre los distintos acopios de áridos gruesos.

Como ya se ha indicado, las existencias de los distintos tamaños de áridos deben mantenerse separadas en todo momento mediante barreras físicas, si es necesario. Las tolvas de alimentación en frío y los alimentadores están calibrados para proporcionar una cantidad específica de cada tamaño de árido de cada tolva. Si los distintos materiales están

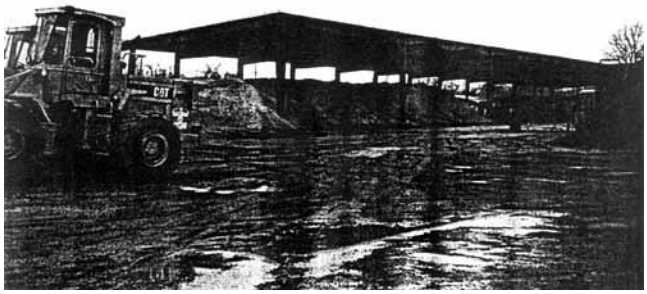


FIGURA 6-1 Acopio de áridos cubiertos.

Si los áridos se mezclan en los acopios, se producirá una combinación de tamaños en cada tolva de alimentación en frío. Esta mezcla del aglomerado causará variaciones en la gradación del HMA producido por una planta de mezclado de tambor y puede causar problemas con tolvas calientes desequilibradas en una planta por lotes.

La segregación es uno de los principales problemas de los áridos apilados. Muchos de los problemas de los áridos se deben a una mala manipulación de los mismos durante las operaciones de acopio y descarga. Siempre que sea posible, los áridos deben acopiarse por fracciones de tamaño individual. Un material bien clasificado o clasificado de forma continua no debe almacenarse en una sola pila. Los áridos de mayor tamaño, sobre todo cuando se combinan con los de menor tamaño, tienden a rodar por la superficie de la pila y acumularse en el fondo, lo que provoca segregación.

La prevención de la segregación comienza con la construcción de la pila. Si es posible, los acopios deben construirse en capas horizontales o ligeramente inclinadas. Si se utilizan camiones para transportar los áridos a la planta, cada carga debe verterse en una sola pila, tal como se muestra en la Figura 6-2. Cualquier procedimiento de construcción que provoque que los áridos sean empujados o vertidos en una sola pila, debe realizarse en una sola pila. Deberá evitarse cualquier procedimiento de construcción que provoque que el árido sea empujado o vertido por el lateral de la pila, ya que estas prácticas pueden provocar segregación. Los camiones y las palas cargadoras deben mantenerse alejados de los acopios, ya que pueden provocar la rotura de los áridos, la generación de finos y la contaminación de los acopios.

El árido que sale del extremo de una apiladora radial puede segregarse de tres maneras. En primer lugar, si el tamaño de las partículas es pequeño y si el viento es fuerte, las partículas más gruesas pueden caer directamente hacia abajo, y las partículas más finas serán arrastradas por el viento hacia un lado de la pila. En segundo lugar, y lo que es más habitual, aunque no haya viento y los áridos caigan en línea recta, se segregarán. Las partículas de arena tienen menos energía y no ruedan lejos cuando caen.

FIGURA 6-2 Pilas horizontales de acopio

tierra. Los trozos más grandes tienen más energía y rodarán hacia el borde exterior de la pila. En tercer lugar, si la velocidad de la cinta transportadora es alta, las partículas más gruesas se lanzarán más lejos de la parte superior de la cinta, y las partículas más finas caerán más directamente en la pila de acopio. En la Figura 6-3 se muestra un ejemplo del uso de una cinta transportadora para crear una pila de acopio de RAP.

Extracción de áridos del acopio

El correcto funcionamiento de la pala cargadora utilizada para cargar los camiones de transporte o los depósitos de alimentación en frío de la planta de asfalto ayudará a evitar problemas de segregación y variación de la granulometría de los áridos. El borde exterior de la pila será generalmente más grueso que el interior porque, como se ha indicado, las partículas de árido más grandes tienden a rodar por el lateral de la pila. Los cambios significativos en la gradación pueden ser el resultado de la forma en que se produjo la pila. El operador de la cargadora

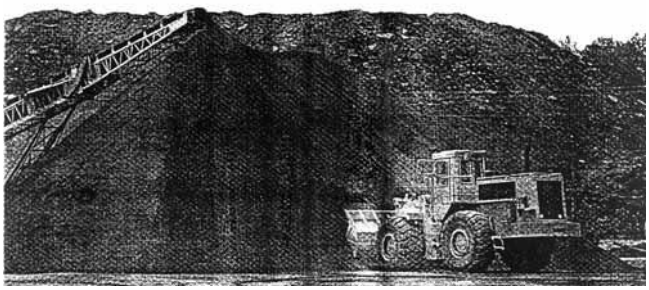


FIGURA 6-3 Acopio de RAP mediante apilamiento radial.

Debería eliminar el agregado en una dirección perpendicular al flujo de agregado hacia el montón y debería trabajar toda la superficie del frente del acopio. Esta práctica ayudará a minimizar los cambios en la gradación del agregado y la variación en el contenido de humedad de la mezcla producida por las plantas de asfalto.

Al limpiar los bordes del acopio, el operador del cargador debe tener cuidado de no empujar o volcar material en el suelo del área de trabajo que contaminaría el acopio. Al cargarse desde un acopio, el operador del cargador debe asegurarse de que el cubo del cargador esté lo suficientemente alto para estar en el acopio y no en el material del área de trabajo..

Al cargar desde un acopio construido en capas, el operador del cargador debe procurar obtener cada carga de cubo ingresando en la capa inferior en el punto medio aproximado de su altura y recogiendo a través de la capa superior. Esta práctica resulta en que la mitad del agregado provenga de cada capa; también vuelve a mezclar el agregado, lo que a su vez reduce la segregación. La eliminación de agregado de un acopio debe ser planificada de manera que un mínimo de agregado sea perturbado con cada carga de cubo. Retirar agregado desde la base de un gran acopio suele provocar que las partículas más gruesas rueden hacia abajo por la cara del montón. Esto puede aumentar los problemas de segregación.

Además de trabajar la cara del acopio, el cargador el operador debe utilizar técnicas sólidas de gestión de acopios. Una buena práctica es rotar los acopios para que el primer material puesto en el acopio sea retirado primero. Las áreas segregadas del acopio deben ser mezcladas nuevamente por el operador del cargador en el sitio del acopio. El operador no debe alternar entre cargas de agregado grueso y fino en los contenedores de alimentación en frío con el fin de mezclarlos. Este método puede causar problemas en la gradación del agregado. Hacerlo causará problemas significativos para lograr la gradación de agregado requerida en la mezcla, independientemente del tipo de planta que se utilice para producir la mezcla. Sedebe señalarse que el mejor enfoque para minimizar la segregación es siempre utilizar técnicas adecuadas de acopio, en primer lugar, como se discutió anteriormente, y no depender del operador del cargador para volver a mezclar materiales segregados de manera adecuada.

Generalmente, el RAP debe ser acopiado utilizando las mismas técnicas descritas para el agregado. Si el RAP es entregado al acopio en grandes piezas o losas, debe ser triturado antes de su uso en la planta. Si el RAP ha sido producido por fresado en frío, el material más fino tiende a retener más humedad de la lluvia cuando está almacenado, en comparación con el RAP almacenado en piezas más grandes.

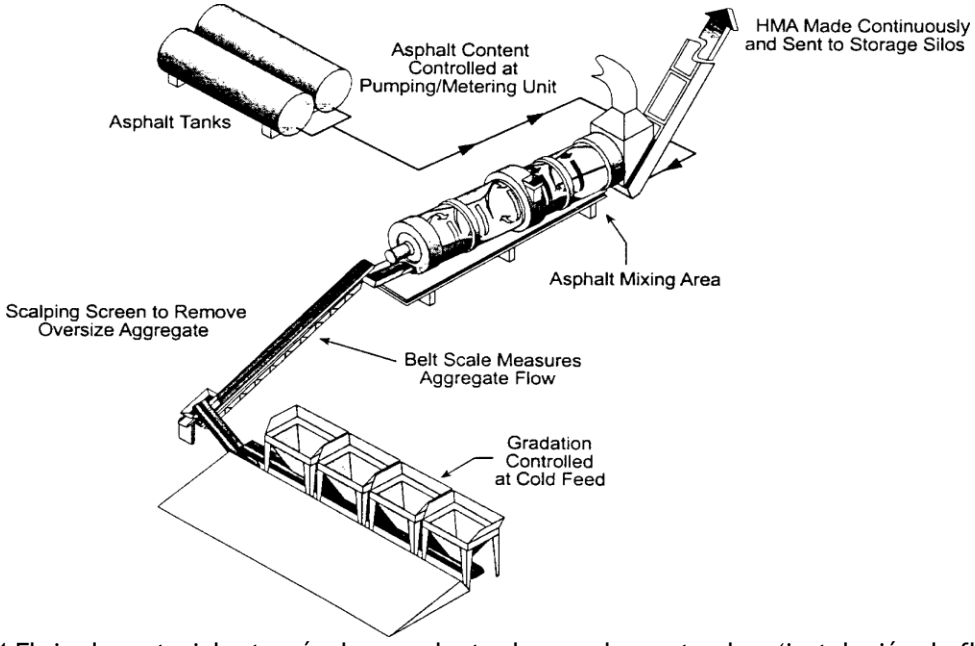
La segregación del RAP en partículas grandes y pequeñas ocurre con mayor facilidad que en el caso de los agregados, ya que el Pavimento Asfáltico Recuperado suele contener una mayor variedad de tamaños de partículas que es típico de los acopios de agregado. Normalmente esto no es un problema porque las piezas de RAP generalmente se descompondrán dentro del mezclador de tambor o en la planta de lotes durante el calentamiento, secado y procesos de mezcla. Si una cantidad significativa de grandes trozos de RAP [piezas mayores de 50 mm (2 in.) de tamaño] se alimenta a la planta a la vez, sinembargo, esos trozos pueden no ser calentados adecuadamente y mezclados con el nuevo agregado y el material aglutinante de asfalto. Por lo tanto, se debe tener cuidado para asegurar que el RAP el material alimentado a la planta sea lo más consistente posible en gradación posible. A menudo es necesario tamizar y luego triturar las piezas más grandes de RAP para asegurar una adecuada transferencia de calor y mezcla del RAP y el nuevo agregado dentro del mezclador de tambor.

SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN EN FRÍO PARA NUEVO AGREGADO

Típicamente, los sistemas de alimentación en frío en plantas de HMA por lotes y plantas de mezcla en tambor son similares. Cada una consiste en contenedores de alimentación en frío, cintas alimentadoras, cintas transportadoras, una cinta de recolección y una cinta transportadora de carga. En la mayoría delas plantas de mezcla en tambor y en algunas plantas de lotes, se incluye una criba de eliminación de materiales grandes en el sistema en algún momento. Si el RAP también se estáalimentando en la planta para producir una mezcla reciclada, un alimentador en frío adicional contenedor o contenedores, cinta de alimentación y/o cinta de recolección, criba de desbaste y cinta de carga son necesarias para manejar el material extra.

Tolvas de alimentación en frío y cintas de alimentación

El flujo de agregados a través de una planta comienza en los contenedores fríos de alimentación, como se ve en la Figura 6-4. La planta está equipada con múltiples contenedores para manejar los diferentes tamaños de nuevo agregado utilizado en la mezcla. La mayoría de los contenedores de alimentación en frío son rectangulares en forma, tienen lados inclinados y tienen una abertura trapezoidal en la parte inferior. Un mamparo o divisor debe ser utilizado entre cada tolva de alimentación en frío para prevenir el desbordamiento del agregado de un contenedor aotro. La mezcla resultante de tamaños de agregado puede alterar significativamente la gradación de la mezcla que se está produciendo, particularmente en una planta de mezcla en tambor, donde no se utilizan pantallas para redimensionar el agregado después de que se seca. Si los divisores no están colocados entre las tolvas de alimentación en frío y la mezcla de agregados de diferentes tamaños presenta un problema, estos deben ser instalados.



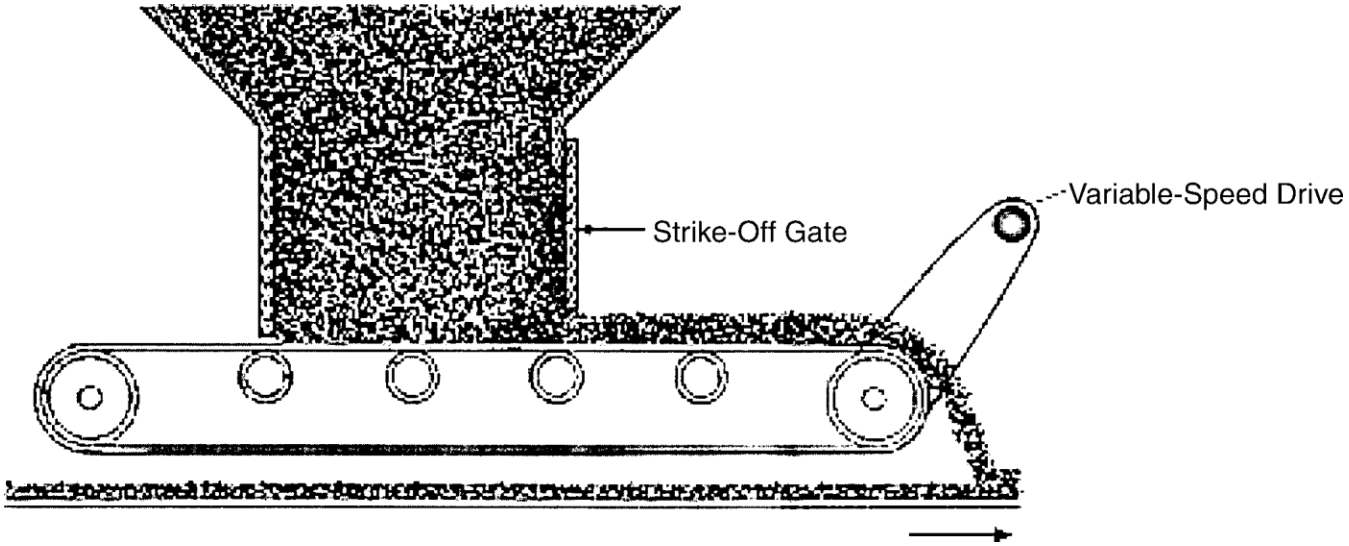
F I G U R A 6 - 4 Flujo de material a través de una planta de mezcla por tambor (instalación de flujo continuo).

Es importante no apilar el agregado más alto que la parte superior de los muros de contención para evitar que se derrame hacia contenedores adyacentes, nuevamente para prevenir que el agregado en un contenedor se derrame en el contenedor adyacente. Si los contenedores desbordan, la contaminación resultante del agregado de materiales llevará a una diferencia en la gradación de la mezcla de HMA producida.

Cada tolva de alimentación en frío está equipada con una compuerta para controlar el tamaño de la abertura de descarga en el contenedor y una alimentadora de banda para extraer el agregado de cada contenedor a un ritmocontrolado tasa. En algunas plantas, La velocidad de la banda alimentadora debajo del contenedor es fija; la cantidad de agregado que se retira del contenedor se determina por la configuración de la abertura de la compuerta. El grado de control ejercido sobre la cantidadde agregado retirado de cada contenedor está gobernado porel número de posibles configuraciones de compuerta en cada compuerta alimentadora. El tamaño de la compuerta se establece levantando o bajando la compuerta usando un manivela manual o eléctrica, o des- atornillando, moviendo y volviendo a atornillar una placa deslizante en un extremo del contenedor.

La mayoría de los contenedores de alimentación en frío están equipados con bandas alimentadoras de velocidad variable debajo de cada contenedor, como se muestra en la Figura 6-5. La abertura de la compuerta y la velocidad de la banda alimentadora para cada contenedor se ajustan para entregar una cantidad correspondiente a la proporción deseada de ese agregado necesario en la mezcla. Cuanto más se requiere un agregado particular, mayor es la abertura de la puerta de descarga del contenedor. La velocidad de cada banda se establece de acuerdo con la cantidad exacta de material retirada del contenedor. Si un pequeño cambio es necesario en la cantidad de material a ser entregado desde un contenedor, la velocidad de la banda alimentadora puede ser aumentada o disminuida para acomodar ese cambio. Teóricamente, es posible retirar agregado de un contenedor utilizando el rango completo de velocidad de la banda, del 1 al 100 por ciento de la velocidad máxima. En la práctica, solo del 20 al 80 por ciento de la velocidad máxima de la banda (idealmente más cerca de 50 por ciento) debe ser utilizado al ajustar la tasa de alimentación de agregado. Esta práctica permite al operador de la planta cierta flexibilidad para variar la tasa de producción de cada alimentador para cambios en las condiciones de operación sin tener que cambiar la configuración de las aberturas de la compuerta.

Si se necesita un gran cambio en la tasa de alimentación para un particular tamaño de agregado, sin embargo, la abertura de la compuerta en el extremo de descarga del contenedor deberá ser ajustada. La configuración de velocidad de cada banda alimentadora se muestra en la consola del operador en el remolque de control de la planta y se muestra típicamente como un porcentaje de la velocidad máxima de la banda. Si la banda alimentadora debajo de una tolva de alimentación en frío está operando a menos del 20 por ciento o más del 80 por ciento de la máxima velocidad, la configuración de la compuerta puede necesitar ser cambiada para que la banda pueda operar más cerca del medio de su rango de velocidad para la tasa de producción seleccionada.



F I G U R A 6 - 5 Cinta alimentadora continua.

La configuración de velocidad para cada cinta alimentadora se ajusta independientemente para permitir la cantidad adecuada de agregado a ser extraído de cada contenedor. Una vez determinado, la velocidad de todas las cintas alimentadoras está sincronizada de modo que un cambio en la velocidad de una es proporcional al cambio en la velocidad de todas las demás. Así, si la producción de la planta se incrementa de 225 a 320 toneladas (250 a 350 toneladas) por hora, un cambio en la configuración del control maestro provoca un correspondiente cambio en la velocidad de todas las cintas alimentadoras.

Cada tolva de alimentación en frío y su cinta alimentadora compañera deben estar equipados con un sensor de no flujo (típicamente un interruptor de límite) que alertará al operador cuando no haya agregado saliendo de la tolva de alimentación en frío. Si el contenedor está vacío o el agregado ha formado un puente sobre la descarga de apertura en el contenedor, y no se está descargando material en la cinta de recolección, el sensor de no flujo indicará la condición emitiendo una alarma audible o automáticamente apagando la planta después de un tiempo preestablecido.

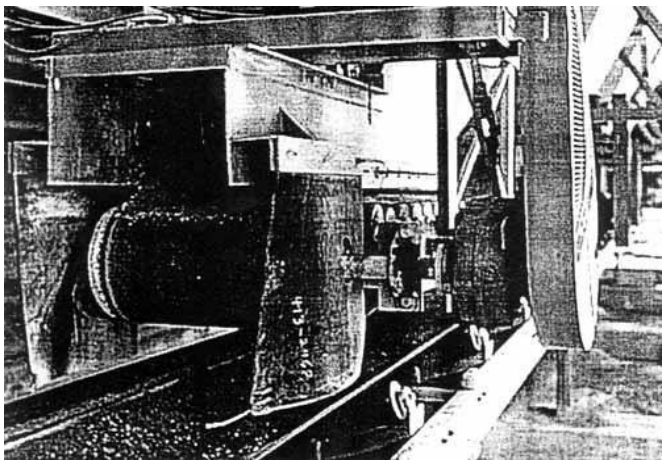
Cinta de recolección

Como se muestra en la Figura 6-6, el agregado depositado desde cada banda de alimentación cae sobre un transportador de recolección ubicado debajo de los transportadores individuales, que recoge el agregado descargado de las tolvas. La velocidad de la cinta es constante, por lo que la cantidad de agregado depositado depende del tamaño de la apertura de la compuerta y la velocidad de la cinta alimentadora bajo cada tolva de alimentación en frío. Para reducir la acumulación en esta cinta, especialmente con agregados mojados, los más gruesos deben colocarse primero. La arena, con mayor contenido de humedad, podría pegarse a la cinta si se coloca primero.

ser removida continuamente. Esto puede, a su vez, afectar la gradación del agregado en la mezcla.

Pantallas y dispositivos de cribado

En plantas de mezcla por tambor, es deseable insertar un cribado en el sistema de alimentación en frío para evitar que material de gran tamaño entre en el mezclador. El cribado puede a veces lograrse colocando una pantalla sobre la parte superior de los contenedores de alimentación en frío. En muchos casos, sin embargo, esta pantalla es solo undispositivo tipo grizzly con relativamente grandes aberturas. Debido al gran volumen de agregado que se entrega a la vez desde la parte frontal del cargador a una tolva de alimentación en frío, una pantalla con pequeñas aberturas



F I G U R A 6 - 6 Cinta de recolección debajo de los contenedores de alimentación en frío.

No puede manejar adecuadamente el flujo de los agregados desde el balde del cargador hasta el contenedor. Las cribas de desbaste, colocadas sobre las tolvas de alimentación en frío, se usan principalmente para el agregado grueso y el RAP. Estas eliminan materiales perjudiciales como raíces, vegetación, terrones de arcilla y agregados de tamaño excesivo. Generalmente se ubican entre el transportador recolector y el tambor (ver Figura 6-7). Aunque no siempre es necesario utilizarlas para agregados procesados en cantera, es recomendable para evitar que materiales grandes entren al tambor y afecten

En plantas por lotes, las cribas de desbaste son esenciales si las de la torre de mezclado han sido eliminadas u omitidas. Las aberturas suelen ser ligeramente mayores al tamaño máximo del agregado usado en la mezcla. Normalmente, se emplea una criba de un solo nivel, aunque algunas plantas utilizan modelos de dos niveles para controlar dos tamaños máximos de agregado sin cambiar la criba (ver Figura 6-8). En estos casos, una compuerta redirige el material retenido en la criba inferior al transportador de carga según sea necesario.

FIGURA 6-7 Criba de desbaste de una sola cubierta en una planta de mezcla continua.

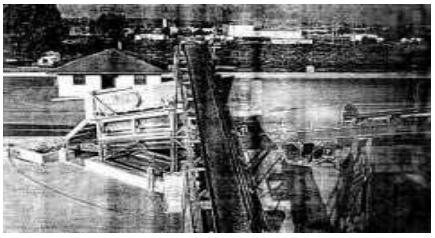


FIGURA 6-8 Criba de desbaste de dos cubiertas en un mezclador continuo con selector de cubierta accionado por aire.

La compuerta abatible puede operarse de forma manual o automática. Las aberturas en la criba pueden ser cuadradas o ranuradas. La ventaja de la criba ranurada es que se puede manejar el mismo volumen de material con una superficie de criba más pequeña. Algunas cribas de desbaste están equipadas con un canal de derivación. Este dispositivo permite que el agregado en el transportador recolector deposita directamente el material en el transportador de carga sin pasar por la criba. Este procedimiento se utiliza a veces cuando se alimenta a la planta con agregado procesado en cantera o con agregado que se sabe que está libre de materiales perjudiciales. Un diseño de tolvas de alimentación en frío incluye una pequeña criba de desbaste debajo de cada contenedor, en lugar de colocar una criba de desbaste al final del transportador recolector. El agregado de un contenedor específico cae de la banda alimentadora sobre la criba de desbaste. El material con el tamaño adecuado pasa a través de la criba y cae en el transportador recolector. Las piezas de mayor tamaño ruedan por la criba hacia un canal de rechazo que deposita este agregado en una pila junto a cada contenedor para su posterior eliminación. Debido a que estas cribas de desbaste individuales de los contenedores son muy pequeñas, la cantidad adecuada de agregado no pasará a través de la criba hacia el transportador de carga si estas se obstruyen o bloquean. Por lo tanto, el funcionamiento de estas cribas de desbaste debe ser monitoreado regularmente.

Transportador de carga en plantas de mezcla por lotes

Los agregados gruesos y finos combinados se descargan del transportador recolector hacia el transportador de carga para ser transportados al tambor. En una planta de mezcla por lotes, este transportador entrega el agregado a la rampa inclinada en el extremo superior del secador. El transportador de carga es una banda simple que opera a una velocidad constante, pero transporta una cantidad variable de agregado, dependiendo del volumen de agregado entregado desde las tolvas de alimentación en frío. El transportador debe estar equipado, por lo general, con un dispositivo como una cuchilla rascadora o un cepillo, ubicado en la parte inferior de la banda, para limpiar la banda

mientras gira. Este dispositivo evitará la acumulación de agregado en la banda. Si una cantidad significativa de agregado fino (arena) se acumula continuamente en la banda y debe retirarse, se debe cambiar el orden de los agregados colocados en el transportador recolector desde las tolvas de alimentación en frío, si es necesario, de manera que los agregados más gruesos se coloquen primero en la banda.

Plantas de mezcla continua (Drum-Mix)

En una planta de mezcla continua de flujo paralelo, el transportador de carga lleva el agregado a una rampa de carga sobre el quemador del tambor o a un transportador de lanzamiento ubicado debajo del quemador. Desde uno de estos dos puntos de entrada, los agregados son introducidos al tambor mezclador. En una planta de mezcla continua de contraflujo, el transportador de carga transporta el agregado a una rampa inclinada en el extremo superior del tambor.

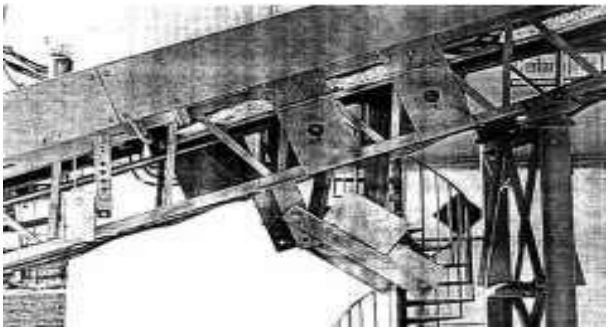


FIGURA 6-9 Báscula de banda.

En ambos tipos de plantas, el transportador de carga cuenta con un sistema de báscula de banda (como se muestra en la Figura 6-9) que mide la cantidad de agregado, en toneladas por hora, que se alimenta al tambor mezclador. La báscula de banda determina el peso del agregado que pasa sobre el rodillo pesador. El transportador de carga opera a una velocidad constante que es independiente de la velocidad de los otros transportadores. La báscula de banda está ubicada cerca de la mitad de la longitud del transportador de carga. Un rodillo pesador, como se muestra en la Figura 6-10, es el componente principal del sistema de báscula de banda. Este rodillo es diferente de los rodillos fijos en el marco del transportador, ya que es móvil y está conectado a una celda de carga. A medida que los agregados pasan sobre el rodillo pesador, el peso del material se registra como una señal eléctrica en el sistema de control computarizado. Sin embargo, el valor del peso por sí solo no tiene significado, ya que solo cubre un instante en el tiempo. Por ello, el transportador de carga también está equipado con un sensor de velocidad de la banda, como se muestra en la figura. Este dispositivo, que usualmente se encuentra en la polea tensora de la banda, es un tacómetro que, junto con el diámetro de la polea, se utiliza para medir la velocidad real de la banda transportadora. Para obtener una lectura precisa de la velocidad de la banda, es esencial que la banda del transportador de carga esté tensa alrededor de la polea tensora por gravedad, como se muestra en la Figura 6-10. Cualquier deslizamiento de la banda sobre el sensor de velocidad dará como resultado una lectura errónea y un cálculo incorrecto del peso del agregado húmedo que se introduce en el tambor mezclador. Algunos transportadores están equipados con un sistema tensor accionado por aire, ubicado en la polea del eje trasero, que funciona de manera similar al sistema tensor por gravedad. El propósito de este sistema es mantener la banda tensa y eliminar posibles problemas de lecturas incorrectas del sensor de velocidad de la banda. La información del rodillo pesador en la báscula de banda y del sensor de velocidad de la banda se combina para determinar el peso real del agregado en toneladas por hora. Este valor corresponde al peso húmedo e incluye la humedad del agregado. El peso húmedo se convierte en peso seco mediante el sistema computarizado de la planta, de manera que se pueda añadir la cantidad adecuada de cemento asfáltico a la mezcla. El contenido promedio de humedad en los agregados gruesos y finos combinados se

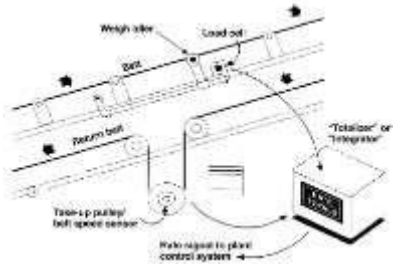


FIGURA 6-10 Cómo funciona una báscula de banda.

introduce manualmente. El contenido de humedad de cada uno de los agregados que se alimentan a la planta debe verificarse regularmente, y se debe

determinar la cantidad promedio de humedad en el agregado entrante. Esta determinación debe realizarse siempre que cambie el contenido de humedad de los acopios de agregados, como después de una lluvia, o al menos dos veces al día. Durante períodos de clima seco constante, esta frecuencia puede reducirse a una vez al día. Un ingreso incorrecto del contenido de humedad en el sistema computarizado provocará una cantidad inexacta de material ligante agregado a la mezcla. Si el contenido real de humedad del agregado entrante es mayor que el valor ingresado en el sistema, se estará introduciendo al tambor un peso seco de agregado ligeramente menor al deseado, y se añadirá más cemento asfáltico del necesario al agregado. Por el contrario, si el contenido real de humedad del agregado es menor que el valor ingresado, se introducirá más agregado en el tambor mezclador, y el contenido de ligante será ligeramente menor. La diferencia en el contenido de asfalto dependerá, por supuesto, de la diferencia entre los valores reales y los ingresados dehumedad. Si los agregados transportados en la banda están relativamente secos, todos los agregados que pasen por la báscula de banda ingresarán al tambor. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, si el contenido de humedad de los agregados es alto, es posible que parte del agregado fino se adhiera al transportador de carga quedar en la banda transportadora. Este material "extra" no será alimentado al tambor, sinoque permanecerá en la banda. Si no se elimina con una cuchilla rascadora o un cepillo, este material será detectado continuamente por la báscula de banda, y la computadora de la planta calculará un peso mayor de agregado ingresando al tambor del que realmente está entrando. En consecuencia, la computadora enviará una señal a la bomba de asfalto para que entregue más cemento asfáltico a la planta, considerando el supuesto agregado adicional. Por lo tanto, es fundamental que la cuchilla rascadora o el cepillo estén en su lugar, limpiando continuamente la banda transportadora de carga mientras lleva el agregado al tambor mezclador. Como se mencionó anteriormente, la cantidad y granulometría del agregado fino eliminado por la cuchilla cambiarán lagranulometría de la mezcla de HMA producida porla planta.

Básculas de banda en contenedores individuales

En algunas plantas, los contenedores individuales de alimentación en frío pueden estar equipados con sistemas de básculas de banda ubicados en las bandas alimentadoras individuales. En esta configuración, la banda debajo de cada contenedor debe ser más larga que las bandas alimentadoras sin báscula de banda. Por lo general, una planta con básculas de banda en contenedores individuales no tendrá una báscula instalada en la última banda alimentadora, la más cercana al tambor mezclador. Sin embargo, se instala otra báscula estándar en el transportador de carga. Este último sistema proporciona datos sobre el peso combinado de todos los agregados, al igual que el sistema de básculas de banda en la mayoría de las plantas de mezcla continua. La computadora y los controles de la planta pueden mostrar la cantidad de agregado extraído de cada contenedor de alimentación en frío. La cantidad de material entregada desde los contenedores equipados con básculas de banda individuales se lee directamente, después de descontar la humedad de cada fracción de agregado. El peso del agregado descargado del último contenedor se determina restando (usando la computadora) la cantidad de agregado pesada por los alimentadores individuales del peso total del agregado medido por la báscula de banda en el transportador de carga, ajustado por el contenido de humedad.

Sistemas de alimentación en frío para pavimento asfáltico recuperado (RAP)

El sistema de alimentación en frío para manejar RAP es esencialmente el mismo que el sistema convencional de alimentación en frío para agregado nuevo. En la mayoría de las plantas, como se muestra en la Figura 6-11, se utiliza un contenedor de alimentación en frío separado. Este contenedor (o contenedores) es similar a los contenedores utilizados para el agregado, excepto que los cuatro lados de los contenedores de RAP suelen ser mucho más empinados. Los lados más inclinados permiten que el agregado recubierto de asfalto se descargue más fácilmente de los contenedores. Esto es particularmente importante en climas cálidos o húmedos, cuando el RAP puede volverse adherente.

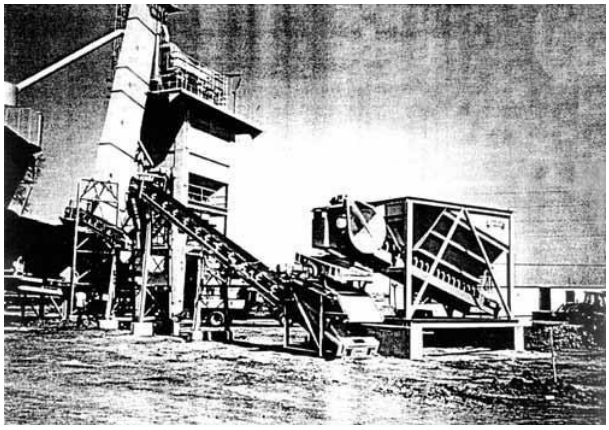


FIGURA 6 – Alimentador inclinado de RAP

Los lados más inclinados reducen la tendencia del material recuperado a bloquear laabertura en la parte inferior del contenedor.

Si se utiliza un arreglo de tolvas de alimentación en frío separado para el material recuperado, normalmente hay una cinta alimentadora de velocidad variable debajo. Las tolvas de alimentación tienen una compuerta que se ajusta a varias aberturas. El RAP, entregado al contenedor por un cargador frontal, se descarga en la cinta alimentadora. Si solo se utiliza un contenedor de alimentación en frío, el RAP se transfiere a un transportador de carga. Si se emplea más de un contenedor de alimentación en frío, la cinta bajo cada contenedor entrega el RAP a un transportador de recolección y luego al de carga.

El RAP debe pasar a través de un tamiz para eliminar cualquier pieza sobredimensionada de la mezcla asfáltica. Una alternativa es colocar una criba de desbaste o una rejilla de barras fijas sobre el contenedor de alimentación en frío y así eliminar el material sobredimensionado y extraño antes que entre en el contenedor. Otra alternativa es colocar un pequeño triturador en el sistema entre el contenedor de alimentación en frío y la cinta transportadora de carga para reducir el tamaño de cualquier pieza de RAP.

Después de salir de la criba de desbaste, el RAP se deja caer en el transportador inclinado para ser llevado a la planta. Si se está transportando a una planta de lotes, el material puede ser entregado al pie (inferior) del elevador caliente, a una de las tolvas en la parte superior de la planta, o al embudo de pesaje. Si el RAP se está transportando por el tambor, el transportador de carga estará equipado con un sistema de puente de pesaje que mide el peso del material que se mueve a través de él, así como la velocidad de la cinta. Este peso, en toneladas por hora, incluye la humedad en el RAP. El valor del contenido de humedad se introduce manualmente en los controles, y el peso seco es calculado por la computadora. La información determinada del sistema de báscula en la cinta de carga de RAP se combina con los datos del sistema para el agregado, y así determinar la tonelada de entrada de la planta.

Para la mayoría de las plantas de mezcla por lotes, el transportador de carga entrega el RAP en la entrada rotativa central ubicada en el tambor de mezcla, como se discute en la Sección 9. Para algunas plantas de mezcla en tambor de contraflujo, el transportador de carga entrega el RAP en la parte superior de la cámara, justo antes del punto de inyección de cemento asfáltico, como se discute en la Sección 10. Para otras plantas de mezcla en tambor de contraflujo, el RAP se entrega a un tambor exterior donde se mezclan el agregado, el RAP y el cemento asfáltico.

Plantas de Mezcla de Tambor de Alimentación Única

Un número muy limitado de plantas de mezcla en tambor tiene solo un conjunto de tolvas de alimentación en frío. Algunas tolvas se usan para almacenar el nuevo agregado, y los otros se utilizan para manejar el RAP. Para un tipo de planta que aún está en uso pero ya no se fabrica, los agregados nuevos y reciclados se introducen en el extremo del quemador de la planta de mezcla por tambor al mismo tiempo. En este caso, el RAP se maneja de la misma manera que el agregado. Se puede depositar debajo o encima del agregado, dependiendo de cuáles tolvas de alimentación en frío se seleccionen para contener los agregados recubiertos de asfalto. El material recuperado se deposita sobre el agregado para que sea expuesto a una pulverización de agua (para reducir problemas) al subir por el transportador de carga.

Plantas de Mezcla de Tambor de Alimentación Dividida

La mayoría de las plantas de mezcla están equipadas con un sistema de alimentación dividida para manejar el RAP. Típicamente, se utiliza un contenedor de alimentación fría separado y un sistema de transporte para introducir el material en el mezclador de tambor a través de una entrada central rotativa.

En algunas plantas de mezcla por lotes más antiguas, no se utiliza un contenedor de alimentación en frío separado para el RAP. En cambio, el material se coloca en uno o más de las tolvas de alimentación en frío convencionales. El transportador de recolección se modifica, sin embargo, se divide en dos cintas diferentes, que se mueven en direcciones distintas. El transportador de recolección debajo de las bandas alimentadoras para el nuevo agregado lleva este material a un transportador de carga que se mueve al extremo del quemador de la planta de mezcla. El transportador de recolección para el RAP lleva el

mismo a un transportador de carga separado que lo lleva a una ubicación de entrada cerca del punto medio de la longitud del tambor mezclador y al extremo superior del tambor.

Independientemente de qué sistema de tolva de alimentación en frío se utilice para el RAP, se emplea una báscula y un sensor de velocidad para medir la cantidad de material recuperado que se mueve por el transportador de carga y entra en el tambor. Usar el mismo sistema de tolva para manejar tanto material nuevo como reciclado ahorra el costo de una tolva de alimentación en frío separada para el RAP, hay mayor probabilidad que se forme un puente en la abertura debido al ángulo más inclinado de los lados de las tolvas de alimentación en frío convencionales.

ADICIÓN DE CAL HIDRATADA

Para reducir la ocurrencia de daños por humedad en la mezcla de HMA, se añade cal hidratada a la mezcla en una proporción del 1 al 2 por ciento del peso del agregado. Puede añadirse dos formas diferentes: como polvo seco o como una suspensión. Si se utiliza una suspensión, se proporciona en una parte de cal hidratada por tres partes de agua. La cal se puede añadir mezclándola con el agregado en la cinta de alimentación fría o introduciéndola en la parte trasera del tambor, similar a un relleno mineral convencional. La adición de cal como relleno mineral se discute en las Secciones 9 y 10.

La cal seca o la lechada se añaden al agregado mientras se mueve a lo largo del transportador de recolección o sube por el transportador de carga. La cal normalmente se coloca sobre el agregado y luego se mezcla con el agregado ya sea cuando pasa a través de la criba de desbaste, cuando pasa a través de un conjunto de arados o palas mezcladoras en la cinta, o en un mezclador de línea colocado en el sistema de alimentación en frío entre el transportador de recolección y el transportador de carga. La cantidad de mezcla de la cal que ocurre cuando el agregado pasa a través de la criba de desbaste, normalmente no es suficiente para asegurar que todas las partículas del agregado estén adecuadamente recubiertas con cal. Por lo tanto, este método no debería ser utilizado. Si la cal se va a mezclar con el agregado en la cinta de recolección o carga, se debe usar un conjunto de cuchillas de arado para mover el agregado y la cal de un lado a otro a medida que el material se desplaza por la cinta. Una forma aún mejor de asegurar que la cal hidratada se mezcle adecuadamente con el agregado grueso y fino es colocar un mezclador de doble eje en el sistema de alimentación en frío. Este último método distribuye la cal más uniformemente a través de las partículas de agregado.

CALIBRACIÓN

La tasa de flujo de agregado de cada tolva de alimentación en frío debe determinarse para asegurar que la proporción adecuada de cada agregado se esté entregando desde la tolva a la planta, de modo que la mezcla tenga la graduación correcta. El método utilizado depende del tipo de planta que se esté utilizando y del tipo de cinta transportadora bajo cada silo.

Cada tolva de alimentación en frío debe calibrarse a un volumen de flujo que esté dentro del rango de material que se entregará desde la tolva durante la producción de la mezcla. Idealmente, el contenedor debe ser revisado a tasas que sean aproximadamente iguales al 20, 50 y 80 por ciento de la tasa de flujo operativa estimada.

Si un contenedor de alimentación en frío está equipado con una cinta transportadora de velocidad variable, la forma de cambiar la cantidad de agregado es variar el tamaño de la abertura de la compuerta. En este caso, depende de la proporción de agregado que se extraerá del contenedor. Si, según la información del diseño de mezcla, el 25 por ciento de la cantidad total de agregado en la mezcla asfáltica debe salir de un determinado contenedor, debe calibrarse en el tamaño de apertura de la compuerta que proporcionará esta tasa de flujo. Además, el procedimiento de calibración debe completarse tanto en la configuración de compuerta más grande como en la más pequeña para permitir cambios en la tasa de producción. Si se anticipan cambios significativos en la tasa de producción, las tolvas deben calibrarse con las aberturas de compuerta necesarias para proporcionar la cantidad adecuada de ese tamaño de agregado a la planta.

Muchas tolvas de alimentación en plantas de mezcla por lotes y la gran mayoría de las tolvas de alimentación en plantas de mezcla por tambor de flujo paralelo y flujo inverso están equipados con una cinta banda transportadora de velocidad variable, además de un medio para cambiar el tamaño de la abertura de la compuerta debajo del contenedor. Debe ajustarse a un nivel que entregue la cantidad adecuada de agregado para la tasa de producción deseada de la planta. Además, el contenedor debe calibrarse a tres velocidades diferentes de la cinta transportadora: 20, 50 y 80 por ciento del rango de velocidad de la cinta transportadora. La condición óptima es que el contenedor proporcione la cantidad adecuada de agregado desde la apertura de compuerta preestablecida, con la cinta transportadora operando a aproximadamente el 50 por ciento de su velocidad máxima. Hacerlo permite cierta libertad para aumentar o disminuir la tasa de producción de la planta sin tener que cambiar la configuración de la apertura de la

compuerta en la parte inferior de las tolvas de alimentacion.

La calibración de cada tolva de alimentación en frío se realiza extrayendo agregado de una tolva durante un período de tiempo específico y determinando el peso del agregado entregado durante ese tiempo. En la mayoría de los casos, se determina el peso vacío (tara) de un camión. El agregado se retira del contenedor y se entrega, generalmente mediante un canalón desviador en la cinta de carga, al camión. Después de un período de tiempo establecido, se detiene el flujo del agregado y se pesa el camión para determinar la cantidad de agregado entregado. Para las tolvas equipados únicamente con una banda transportadora de velocidad variable, el proceso de pesaje se realiza con una variedad de configuraciones de apertura de compuerta. Para las tolvas de alimentación que están equipados con cintas transportadoras de velocidad variable, el proceso de calibración puede repetirse con diferentes configuraciones de apertura de compuerta, con al menos tres velocidades de cinta diferentes por apertura de compuerta.

En una planta de mezcla por tambor, también se debe calibrar la báscula. Esto se logra haciendo pasar el agregado por la cinta de carga y, por lo tanto, por el rodillo de pesaje durante un período de tiempo determinado. El agregado se desvía a un camión vacío (tarado). Después de que haya pasado el período de tiempo seleccionado, se detiene el flujo de agregado y se pesa el camión para determinar la cantidad de agregado entregado. El peso así determinado se compara con el peso del agregado calculado por el sistema informático de la planta. Los dos pesos deben estar dentro de la banda de tolerancia establecida por la agencia y típicamente dentro del 1.0 por ciento entre sí. (la báscula de pesaje y de camiones son precisas hasta un 0.5 por ciento). Cabe señalar que ambos métodos utilizados para pesar el material la báscula de cinta transportadora y la báscula de camiones deben cumplir con una tolerancia del 0.5 por ciento del peso verdadero. Dado que un peso se está comparando con el otro y cada uno tiene una tolerancia del 0.5 por ciento, los dos pesos deberían estar dentro del 1.0 por ciento uno del otro.

La báscula debe calibrarse a una tasa de producción que esté cerca de la tasa normal estimada para la planta. Si la mezcladora de tambor va a operar al 90 por ciento de su capacidad, la calibración de la báscula debe completarse a tres tasas de producción: 70, 85 y 100 por ciento de su capacidad. Sin embargo, no será correcta si la planta opera a una capacidad mucho menor, como el 60 por ciento. En este caso, el procedimiento de calibración debería repetirse a la tasa de producción más baja (enmarcando la tasa estimada con una tasa por encima y una tasa por debajo del nivel de producción más probable).

Debido a las diferencias en los procedimientos de operación, marcas de tolvas y plantas de asfalto, es difícil generalizar el procedimiento exacto de calibración. Las instrucciones de calibración proporcionadas con la planta deben seguirse.

RESUMEN

Varios factores deben ser considerados en el almacenamiento, manejo de agregados y RAP, cuando están en la pila de almacenamiento como cuando se alimentan en un lote o planta de mezcla en tambor:

- Las pilas deben construirse sobre una base limpia, seca y estable. Se debe proporcionar un drenaje positivo para cada pila. El agregado de diferentes tamaños debe ser separado.
- El contenido de humedad se determina al menos dos veces al día y mayor frecuencia si las condiciones cambian. El contenido de humedad del agregado que entra en el mezclador de tambor debe ser ingresado en el sistema de control para permitir el ajuste de los controles, el cálculo del peso seco del agregado y la determinación de la tasa de producción.
- Cubrir los montones de agregados finos con un techo debería considerarse para reducir el contenido de humedad del agregado almacenado.
- Los acopios se construyen en capas horizontales o inclinadas. Cualquier procedimiento donde el agregado sea arrojado debe evitarse para prevenir la segregación. El tránsito sobre acopios por camiones y cargadoras frontales debe minimizarse para prevenir la rotura del agregado y la generación de finos.
- El cargador frontal debe trabajar en toda la cara, retirando el agregado en una dirección perpendicular. El operador debe entrar directamente, levantar el cubo y luego retroceder en lugar de recoger a través del montón. Minimizará la segregación causada por el agregado de mayor tamaño. El operador es clave para proporcionar una graduación consistente del material a la planta y minimizar la segregación.
- Si los acopios de agregados gruesos están segregados, el operador no debe colocar un balde de material grueso y luego un balde de material más fino en las tolvas. Los materiales segregados deben ser premezclados por el cargador (o por otros medios) antes de que el material sea introducido en las tolvas.

- Las tolvas de alimentación en frío que se mantienen relativamente llenos de agregado deben estar separados por tabiques entre los contenedores, ubicados en la parte superior de los mismos, para evitar que el agregado destinado a un contenedor se desborde hacia otro.
- El extremo de descarga de la banda alimentadora debe estar equipado con un dispositivo de "sin flujo" para indicar al operador de la planta cuando no se esté entregando una cantidad adecuada de agregado desde un contenedor de alimentación en frío.
- Si la planta está equipada con bandas alimentadoras de velocidad variable, estas deben funcionar a una velocidad que esté entre el 20 y el 80 por ciento de su velocidad máxima. Idealmente, la velocidad de las bandas alimentadoras debe estar en el punto medio de su rango de velocidad para permitir pequeños aumentos o disminuciones en la capacidad de producción de la planta sin necesidad de cambiar los ajustes de las compuertas de Las tolvas de alimentación en frío. Las bandas alimentadoras deben calibrarse a la velocidad a la que operarán normalmente.
- Se debe colocar una criba de desbaste en el sistema de carga de alimentación en frío de una planta de mezcla continua o de una planta por lotes que opere sin cribas, con el fin de eliminar cualquier material de gran tamaño o perjudicial del agregado.
- En las plantas de mezcla continua, se debe verificar el puente de pesaje para asegurarse de que el rodillo de pesaje se mueva libremente y de que la banda transportadora esté bien ajustada alrededor de la polea de tensión por gravedad, lo que garantizará una lectura precisa del sensor de velocidad de la banda.
- Las tolvas de alimentación en frío destinados a RAP (material asfáltico recuperado) deben tener lados inclinados pronunciadamente para evitar que el material obstruya la apertura de la compuerta en la parte inferior del contenedor.
- El sistema de alimentación de RAP, tanto en plantas por lotes como en plantas de mezcla continua, debe incluir una criba de desbaste sobre el contenedor de alimentación en frío o en algún otro punto del flujo del material.
- Las tolvas de alimentación en frío deben calibrarse. Para los contenedores equipados con bandas alimentadoras de velocidad constante, el flujo de agregado desde los contenedores debe determinarse en tres configuraciones diferentes de apertura de compuertas: una a la tasa estimada de producción de la planta, otra por encima de esa tasa y otra por debajo de ella.
- En Las tolvas de alimentación en frío equipados con bandas alimentadoras de velocidad variable, los contenedores pueden calibrarse en hasta tres aperturas diferentes de compuertas, así como en tres velocidades de banda diferentes: aproximadamente 20, 50 y 80 por ciento del rango de velocidades de la banda.
- El puente de pesaje en el transportador de carga de una planta de mezcla por tambor también debe calibrarse. Esto debe hacerse recolectando y pesando la cantidad de agregado que pasa sobre el puente de pesaje en un tiempo establecido y comparando ese peso con el determinado por el sistema informático de la planta. Para que el puente de pesaje esté calibrado correctamente, los dos pesos deben estar dentro del 1.0 por ciento de diferencia.

7 Sistema de Suministro de Cemento Asfáltico

El sistema de suministro de cemento asfáltico consta de dos componentes principales. El primero incluye uno o más tanques utilizados para almacenar el cemento asfáltico hasta que sea necesario en la planta de mezcla. El segundo es un sistema de bomba y medidor que se utiliza para extraer el cemento asfáltico del tanque de almacenamiento en proporción a la cantidad de agregado que se entrega al mezclador de tambor o al mezclador por lotes (pugmill). En esta sección se analizan estos dos componentes, así como el uso de materiales líquidos antideslizantes y la calibración del sistema de bomba y medidor. La sección concluye con un resumen de los factores operativos clave a considerar al monitorear el funcionamiento del sistema de suministro de cemento asfáltico.

TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Las La Figura 7-1 muestra una disposición típica de múltiples tanques horizontales de almacenamiento de cemento asfáltico. Todos los tanques de almacenamiento de cemento asfáltico deben calentarse para mantener la temperatura correcta del cemento asfáltico, de manera que su viscosidad sea lo suficientemente baja como para que pueda bombearse y mezclarse con el agregado calentado y secado.

La mayoría de los tanques de almacenamiento de cemento asfáltico se calientan mediante un sistema de aceite caliente y están equipados con un pequeño calentador que mantiene la temperatura del aceite. El aceite caliente se circula a través de una serie de serpentines dentro del tanque de almacenamiento (como se muestra en la Figura 7-2) y el calor se transfiere del aceite, a través de los serpentines, al cemento asfáltico. Este proceso de transferencia de calor reduce la viscosidad del cemento asfáltico, haciendo que fluya hacia arriba y circule, lo que permite que el cemento asfáltico de menor temperatura entre en contacto con el aceite caliente. De esta manera, el sistema de aceite caliente, mediante un conjunto de termopares y válvulas solenoides, mantiene la temperatura adecuada del cemento asfáltico, generalmente en un rango de 150°C (300°F) a 180°C (350°F), dependiendo del tipo y grado de cemento asfáltico que se utilice.

Otra técnica común es el uso de elementos calefactores eléctricos para calentar directamente los tanques de asfalto. Estos elementos, que pueden ser retirados para su mantenimiento, se sumergen directamente en el tanque. Además, se pueden instalar serpentines de calentamiento en el tanque de asfalto para calentar el aceite usado en las líneas de asfalto y otras partes de la planta que requieran calor.

Un estilo más antiguo y menos común de tanque de almacenamiento de cemento asfáltico es el tanque de calentamiento directo. En este sistema, el cemento asfáltico se calienta mediante un intercambio directo de calor desde la fuente de combustión, a través de una serie de tubos, hacia el cemento asfáltico. Es necesario tener cuidado con este tipo de tanque para evitar el sobrecalentamiento del cemento asfáltico que está en contacto directo con los tubos de calor.

Todos los tanques de almacenamiento deben estar completamente aislados y calefaccionados, y todas las líneas para el cemento asfáltico y el aceite de calentamiento deben estar aisladas para evitar la pérdida de calor. Tanto la línea utilizada para llenar el tanque desde el camión o vagón de transporte como la línea de descarga hacia la planta deben estar ubicadas cerca del fondo del tanque. La línea de retorno desde la bomba debe estar posicionada de manera que el cemento asfáltico entre al tanque a un nivel bajo la superficie del material almacenado, evitando que caiga a través del aire, lo que reduce la oxidación del cemento asfáltico durante el proceso de circulación.

En la mayoría de los tanques de almacenamiento de asfalto, la línea de descarga hacia la planta de mezcla por lotes o de tambor se encuentra en el extremo más cercano a la planta para minimizar la cantidad de tubería requerida. La línea de retorno del cemento asfáltico no utilizado por la planta (según la configuración específica de bomba y medidor) suele estar ubicada en el mismo extremo del tanque. Si se desea circular el contenido del tanque para mantener el material mezclado, la línea de retorno debe colocarse en el extremo opuesto del tanque. De lo contrario, solo se mezclará el material ubicado en el extremo donde están las líneas de descarga y retorno.

Si la planta de mezcla en caliente (HMA) está equipada con más de un tanque de almacenamiento

de cemento asfáltico, debe haber capacidad para bombear material de un tanque a otro. Es fundamental que el operador de la planta sepa de qué tanque se está extrayendo material, especialmente si se almacenan diferentes grados o tipos de cemento asfáltico en los distintos tanques. Todos los tanques de almacenamiento de cemento asfáltico contienen un "residuo" de material en el fondo del tanque. Este material, ubicado debajo de los serpentines de calefacción, generalmente no circula de manera eficiente. El volumen de material en el residuo depende del tipo y diseño del tanque de almacenamiento, la ubicación de los serpentines de calefacción y el tiempo transcurrido desde que se utilizó el tanque.

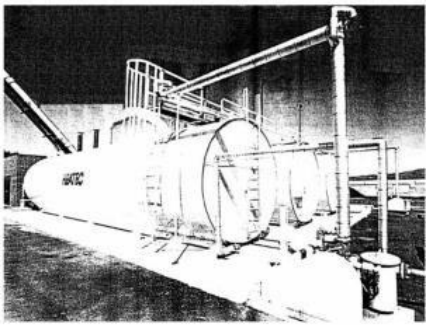


FIGURE 7-1 Typical horizontal asphalt cement storage tanks.

Se reconoce, sin embargo, que típicamente queda algo de cemento asfáltico en el fondo de un tanque "vacío". Por lo tanto, colocar cemento asfáltico de un tipo o grado en un tanque que anteriormente contenía un tipo o grado diferente puede causar una alteración en las propiedades del cemento asfáltico, al punto de que ya no cumpla con las especificaciones. La capacidad de un tanque de almacenamiento de cemento asfáltico es una función de su diámetro y longitud. La cantidad de material en el tanque puede determinarse utilizando una "varilla de medición". La varilla mide la distancia desde la parte superior del domo o la parte superior del tanque hasta el nivel del cemento asfáltico en el tanque (el punto en el que la varilla justo toca la parte superior del material). Esta distancia se anota, y la cantidad de cemento asfáltico en el tanque por debajo de este nivel se determina a partir de la tabla de calibración del fabricante del tanque.

Cuando se entrega cemento asfáltico desde un vehículo de transporte a un tanque de almacenamiento, es importante asegurarse de que el tanque esté limpio o que ya contenga al mismo tipo de material que se está bombeando al tanque. Si está vacío en el momento de agregar el nuevo material, debe verificarse que no se haya acumulado agua en el fondo. Si se carga cemento asfáltico sobre una emulsión asfáltica o sobre una capa de agua en el tanque, puede ocurrir una espuma violenta del cemento asfáltico, creando un grave problema de seguridad. Se debe tener cuidado para asegurarse de que todas las válvulas estén en la posición adecuada para evitar que la presión se acumule en las líneas y cause una explosión. La mayoría de los tanques de almacenamiento de asfalto son horizontales, como se muestra en la Figura 7-1. Sin embargo, cada vez se utilizan más los tanques verticales. Estos minimizan la separación de modificadores en el cementoasfáltico y requieren menos espacio para el almacenamiento.

Sistema de Bomba y Medición

Plantas por Lotes

Las plantas por lotes emplean típicamente uno de dos sistemas para transferir el cemento asfáltico desde el tanque de almacenamiento al balde de pesaje cercano al mezclador (pugmill). El tipo de sistema utilizado depende de la ubicación de la línea de retorno, es decir, si hay una o dos líneas de cemento asfáltico desde la bomba al balde de pesaje.

En el proceso de línea única, se extienden dos líneas desde el tanque de almacenamiento a la bomba, pero solo una línea conecta la bomba con el balde de pesaje. La bomba es una unidad de volumen constante y velocidad constante que funciona de manera continua. El cemento asfáltico se extrae continuamente del tanque de almacenamiento a través de la bomba y regresa al tanque. Cuando se necesita cemento asfáltico en el balde de pesaje, se abre una válvula al final de la línea, en la parte superior del balde, y el material se descarga en el balde. Una vez que se alcanza la cantidad adecuada de cemento asfáltico, determinada por peso y no por volumen, la válvula se cierra y se abre una válvula de alivio de presión en la bomba.

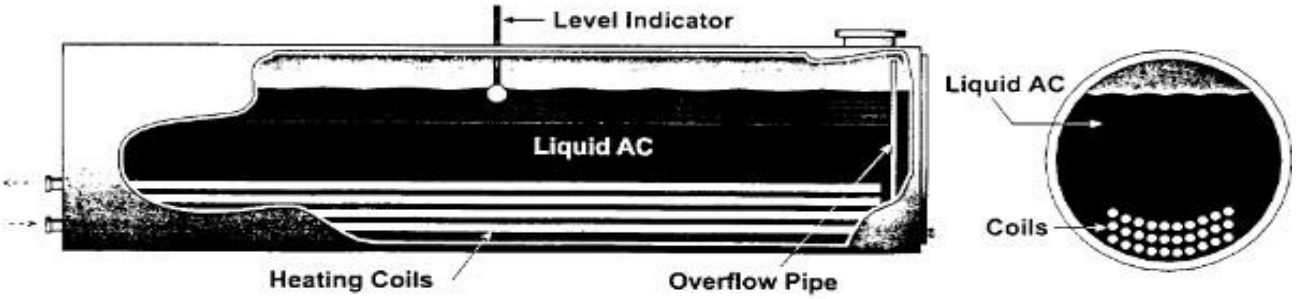


FIGURE 7-2 Heating of horizontal storage tank.

luego pasa a través de la bomba, pero es recirculado de regreso al tanque de almacenamiento, en la segunda línea, en lugar de ser enviado a la planta. Una variación de este sistema permite que el cemento asfáltico circule a través de la propia bomba en lugar de regresar al tanque de almacenamiento. En el proceso de doble línea, una línea se utiliza para entregar el cemento asfáltico al cubo de pesaje, y la segunda línea se utiliza para devolver el cemento asfáltico "excedente" al tanque de almacenamiento. El cemento asfáltico pasa por la bomba hacia una válvula de tres vías en el cubo de pesaje. Cuando se necesita cemento asfáltico en el cubo de pesaje, la válvula se abre y el material se descarga en el cubo. Cuando se alcanza el peso preseleccionado, la válvula se cierra y el cemento asfáltico se recircula por la segunda línea de regreso al tanque de almacenamiento.

Dado que la cantidad de cemento asfáltico utilizada en casi todas las plantas de lotes se mide por peso, no se necesita corrección para la temperatura del cemento asfáltico. Sin embargo, en algunas plantas de lotes más antiguas, la cantidad de cemento asfáltico entregado se determina por volumen. En este caso, la cantidad de cemento asfáltico entregado al mezclador debe corregirse de acuerdo con la temperatura y la gravedad específica del cemento asfáltico. Esto se puede lograr utilizando el procedimiento establecido en la Especificación ASTM D4311.

Plantas de mezcla en tambor

Entrega de cemento asfáltico

La mayoría de las plantas de mezcla continua emplean uno de tres sistemas para extraer el cemento asfáltico del tanque de almacenamiento, medirlo y bombearlo a la planta: *(a)* Una bomba de volumen variable con un motor de velocidad constante, *(b)* Una bomba de volumen constante con un motor de velocidad variable, *(c)* Una bomba de volumen constante con un motor de velocidad constante y una válvula dosificadora. El uso de un sistema de bomba y medidor en particular depende de la marca, el modelo y la fecha de fabricación de la planta, así como de la elección del propietario de la planta.

En un sistema que utiliza una bomba de volumen variable impulsada por un motor de velocidad constante, la cantidad de cemento asfáltico extraído del tanque de almacenamiento se controla cambiando el volumen de cemento asfáltico bombeado. El volumen necesario en la bomba es determinado por la computadora de la planta en proporción a la cantidad de agregado alimentado a la planta. A medida que aumenta la cantidad de agregado que ingresa al mezclador de tambor, también aumenta el volumen de cemento asfáltico que pasa por la bomba. Cuando la planta no utiliza cemento asfáltico, el material pasa continuamente por la bomba y el medidor y a través de una válvula de tres vías configurada para recircular el cemento asfáltico de regreso al tanque de almacenamiento en lugar de enviarlo a la planta.

Un segundo sistema incorpora una bomba de desplazamiento fijo (volumen constante) impulsadapor un motor de velocidad variable. La cantidad de cemento asfáltico entregado al medidor varía cambiando la velocidad del motor. La cantidad de material enviado a la planta también depende de la tasa de alimentación de agregado. Una válvula de tres vías en el sistema, aguas abajo del medidor, permite recircular el cemento asfáltico al tanque cuando no es necesario en la planta.

El tercer sistema consiste en una bomba de volumen constante impulsada por un motor de velocidad constante. En este arreglo, el mismo volumen de cemento asfáltico se extrae del tanque de almacenamiento en todo momento. Una válvula de dosificación se coloca en la línea entre la bomba y el medidor de cemento asfáltico. La posición de la válvula determina el volumen de material enviado a través del medidor. La válvula de dosificación envía parte del cemento asfáltico a través del medidor y el resto a través de la línea de recirculación de regreso altanque de almacenamiento. El sistema también cuenta con una válvula aguas abajo del medidor que permite recircular al tanque el cemento asfáltico que pasa por el medidor. Esta válvula se utiliza durante el período de calentamiento del medidor y durante el proceso de calibración. Una vez más, la posición de la válvula de dosificación está determinada por la tasa de alimentación de agregado al mezclador de tambor, ambos controlados por la computadora de la planta. Un sistema de volumen y velocidad constantes se muestra en la Figura 7-3.

En las plantas de mezcla continua de flujo paralelo, la línea de cemento asfáltico típicamente entra al tambor desde la parte trasera, y el material ligante se descarga en el tambor en un punto normalmente entre un cuarto y un tercio de la longitud del tambor desde el extremo de descarga. En un tipo de planta de tambor de flujo inverso, la tubería de cemento asfáltico se coloca en la unidad de mezcla del tambor, detrás o debajo del quemador, y el material ligante se agrega poco después de que el agregado sale de la corriente de gases de escape. En otro tipo de planta de tambor de flujo inverso, el cemento asfáltico se agrega al agregado caliente en el tambor exterior, alejado del quemador.

Compensación de temperatura

La mayoría de los medidores de asfalto miden el flujo de asfalto por volumen y convierten este volumen en peso utilizando la gravedad específica y la temperatura del asfalto. El cemento asfáltico se

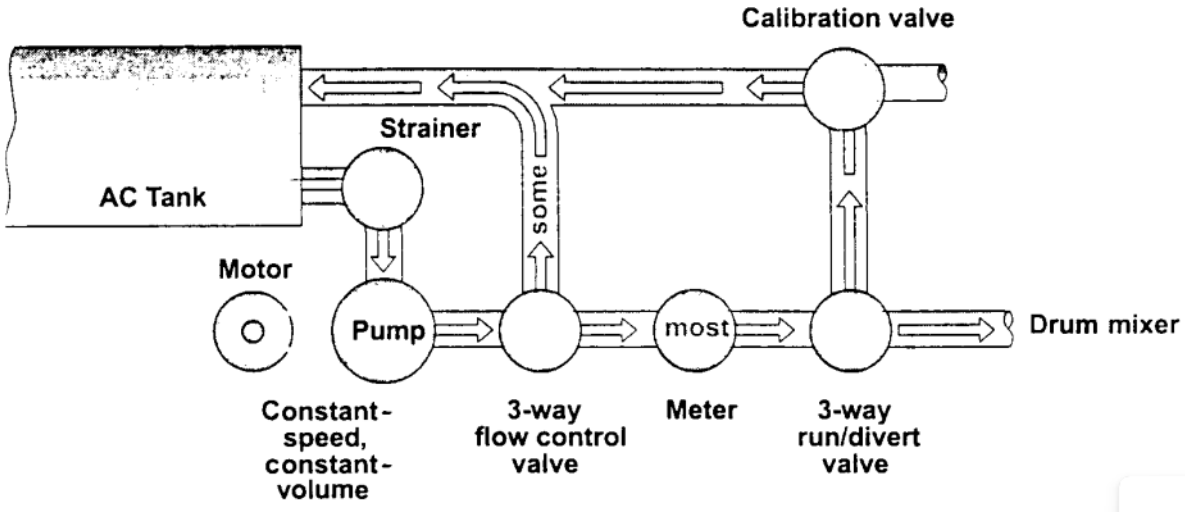


FIGURA 7-3 Sistema de dosificación de asfalto para plantas de mezcla en tambor con bomba de volumen constante y velocidad constante y válvula de control de caudal.

expande cuando se calienta. Por lo tanto, el volumen de cemento asfáltico a 180°C (350°F) será algo mayor que su volumen a 150°C (300°F). Este último volumen será mayor que el volumen a 15°C (60°F), que es la temperatura estándar para determinar el volumen del cemento asfáltico utilizando tablas de conversión basadas en la gravedad específica del cemento asfáltico. Sin embargo, si se conocen la gravedad específica del cemento asfáltico y su temperatura, el volumen medido a una temperatura elevada puede convertirse fácilmente al volumen estándar a 15°C (60°F) utilizando el procedimiento establecido en la Especificación ASTM D4311.

El volumen de cemento asfáltico que pasa por el medidor también cambia con la temperatura. Algunos medidores están configurados para medir la temperatura del cemento asfáltico mientras circula por el sistema y envían esa información, junto con los datos de volumen, a la computadora de la planta. La gravedad específica del cemento asfáltico se ajusta manualmente en los controles. La computadora luego calcula el volumen de cemento asfáltico que se alimenta a la planta a la temperatura estándar de 15°C (60°F) y convierte esa cantidad en un peso que se muestra en la consola de la planta.

En algunos medidores, un dispositivo de compensación de temperatura está instalado directamente en el soporte del medidor. A medida que la temperatura del cemento asfáltico cambia, el medidor detecta el cambio y, con base en la gravedad específica del cemento asfáltico, calcula el volumen a 15°C (60°F) que pasa por el medidor. Este volumen corregido (y su peso correspondiente) se envía luego a la consola de la planta para su visualización.

Independientemente de la disposición específica empleada, el sistema de bombeo de asfalto debe ser capaz de ajustar el volumen de cemento asfáltico que pasa por el medidor en respuesta directa a la demanda del suministro de agregados. La respuesta del sistema de bombas debe estar directamente relacionada con el cambio en la cantidad de material medido por el sistema de puente de pesaje de agregados. Además, el volumen de cemento asfáltico medido a cualquier temperatura dada debe convertirse al volumen a 15°C (60°F). A esta temperatura de referencia estándar, el peso del cemento asfáltico se puede determinar en términos de toneladas de material por hora, al igual que la tasa de alimentación de agregados. La suma de la entrada de agregados (nuevos agregados más RAP) y el peso del cemento asfáltico proporciona la tasa de producción del mezclador de tambor, en toneladas de HMA por hora. A medida que se ajustan las tasas de producción, el sistema de bombeo de asfalto se sincroniza para que el aumento o disminución del cemento asfáltico llegue al tambor al mismo tiempo que el flujo de material aumentado o disminuido alcance ese punto en el tambor.

Otro tipo de medidor de asfalto, llamado “medidor de flujo másico,” mide el flujo de asfalto por peso y, por lo tanto, no requiere correcciones de temperatura.

CALIBRACIÓN

El sistema de bomba y medidor en una planta de mezcla discontinua o continua debe calibrarse para garantizar la entrega precisa de cemento asfáltico a la mezcla. En plantas de mezcla discontinua, la cantidad de cemento asfáltico se mide por peso (aunque algunas plantas antiguas lo hacen por volumen) y se coloca en un balde de pesaje. Por otro lado, en plantas de mezcla continua, la cantidad se mide por volumen

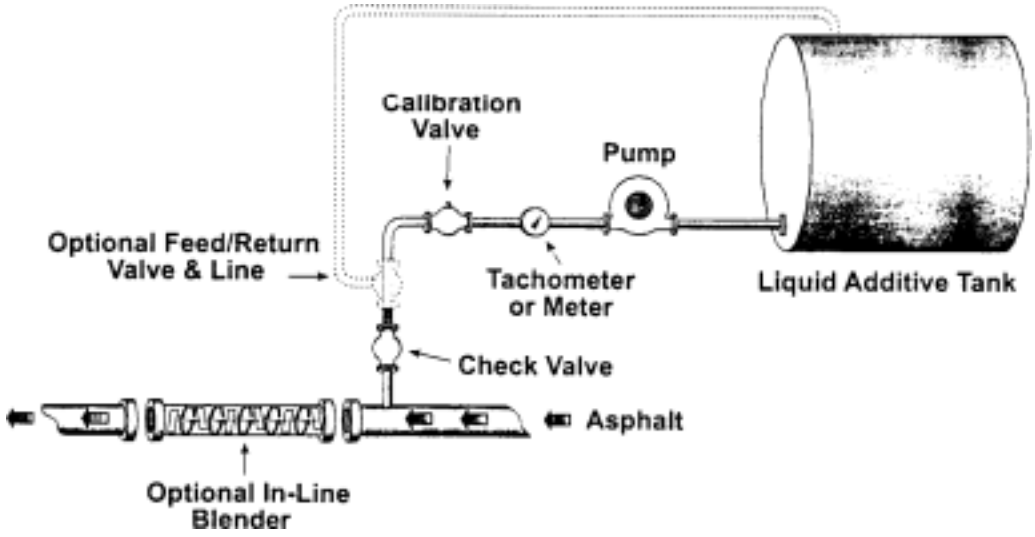


FIGURA 7-4 Sistema de dosificación de asfalto para plantas de mezcla en tambor con bomba de volumen constante y velocidad constante y válvula de control de caudal.

mientras se bombea a través de un medidor hacia la parte trasera del tambor.

En mezcladores continuos, la calibración implica bombear el cemento asfáltico a un recipiente vacío de peso conocido. Se determina el peso real del material entregado y se compara con el peso calculado a partir del volumen registrado por el medidor, corregido por la gravedad específica del cemento asfáltico. Este proceso puede realizarse automáticamente en algunos sistemas. Los valores deben estar dentro del 1.0 por ciento de tolerancia para garantizar una calibración correcta.

ADICIÓN DE MATERIALES ANTIDESGASTANTES LÍQUIDOS

Los aditivos antidesgaste mejoran la adhesión del cemento asfáltico al agregado y aumentan la resistencia al daño por humedad. Estos aditivos pueden mezclarse en diferentes etapas: durante el bombeo desde el camión cisterna al tanque o directamente en el tanque para recircular ambos materiales antes de enviarlos al mezclador de tambor. Sin embargo, el método más común es la mezcla en línea mientras el cemento asfáltico se bombea hacia la planta de mezcla continua. Un sistema típico incluye un tanque dedicado para estos aditivos que se ilustra en la Figura 7-4.

RESUMEN

Consideraciones clave en el sistema de suministro de cemento asfáltico

- El cemento asfáltico en el tanque de almacenamiento debe mantenerse entre 150 °C (300 °F) y 180 °C (350 °F). Tanto el tanque como las líneas de aceite caliente y cemento asfáltico deben estar aislados.
- Las líneas de llenado, descarga y recirculación deben operar por debajo de la superficie del material en el tanque, con la línea de retorno colocada en el extremo opuesto a la línea de descarga.
- El volumen en el tanque debe convertirse a un volumen estándar a 15 °C (60 °F) para mayor precisión.
- En plantas por lotes, la medición por peso elimina la necesidad de correcciones térmicas.
- En plantas de mezcla continua, es necesario corregir el volumen basado en la temperatura y gravedad específica a 15°C (60°F) del cemento asfáltico si el medidor volumétrico no tiene compensación automática.
- Es esencial pesar el material entregado en un tiempo conocido para después confirmar la cantidad corregida considerando temperatura y gravedad específica.

8 Plantas por lote

En esta sección se describe al detalle el funcionamiento y los componentes del HMA (representadas en las Figuras 5-1 a 5-3). Se tratan temas como el manejo de agregados, el sistema de suministro de cemento asfáltico, el calentamiento y secado de los agregados, cribado y almacenamiento de agregados calientes, la mezcla de agregados con cemento asfáltico, la producción de mezcla reciclada, la carga de la mezcla en camiones o silos, el control de emisiones, y finalmente, la calibración. La sección concluye con un resumen de los factores clave de operación que se deben considerar al monitorear el funcionamiento de una planta por lotes.

MANEJO DE AGREGADOS

Almacenamiento de agregados

Las técnicas de almacenamiento utilizadas para el manejo de agregados en una operación de mezcla por lotes no son diferentes de las empleadas en plantas de mezcla continua de flujo paralelo o contraflujo (ver las Secciones 9 y 10, respectivamente; también la discusión sobre almacenamiento y manejo de agregados en la Sección 6). Las técnicas de almacenamiento adecuadas son tan importantes para las operaciones de plantas por lotes como para las plantas de mezcla continua. En particular, se debe tener cuidado en mantener separadas los diferentes tamaños de agregado y evitar la segregación de cada tamaño en los acopios.

A veces se asume que las cribas en la torre de la planta por lotes resolverán cualquier problema relacionado con la variación en la granulometría de los agregados nuevos. Sin embargo, si no se entrega la proporción adecuada de cada tamaño de agregado desde las tolvas de alimentación en frío, la cantidad de agregado en las tolvas calientes estará desequilibrada. Como resultado, la falta de separación en los acopios o la segregación del agregado en uno o más acopios puede causar que una o más tolvas calientes se queden sin material o se sobrecarguen de este.

Sistemas de alimentación en frio para nuevos agregados

Algunas plantas por lotes antiguas tienen tolvas de alimentación en frío equipadas con una cinta transportadora de velocidad constante bajo cada tolva (ver la Sección 6). La cantidad de agregado que se extrae de cada tolva se controla mediante el tamaño de la abertura en la parte inferior. Sin embargo, la mayoría de las plantas cuentan con tolvas de alimentación en frío equipadas con cintas de velocidad variable debajo de cada tolva. La cantidad de agregado extraído se regula tanto por el tamaño de la abertura como por la velocidad de la transportadora. El agregado se descarga desde cada alimentadora hacia la cinta recolectora, que pasa por debajo de todas las tolvas y lleva el material a una criba de rechazo, si es que se utiliza una. Una vez que el agregado pasa por la criba de rechazo, se deposita en la cinta de carga para ser enviado al secador. Si el sistema no incluye una criba de rechazo (lo cual es común porque las cribas en la parte superior de la torre de la planta se usan para eliminar materiales de gran tamaño), el agregado se transfiere directamente de la cinta recolectora a la cinta de carga.

Sistemas de alimentación en frío para RAP

El RAP generalmente se almacena en una tolva de alimentación en frío separada, con lados inclinados y pronunciados, equipada con una cinta alimentadora de velocidad variable o constante. El material se deposita en la cinta alimentadora o recolectora para su transporte hacia una criba de rechazo. Después el RAP se deposita en una cinta de carga para ser entregado a la planta. Una alternativa a este método es utilizar una criba de rechazo en el punto de transferencia entre la cinta recolectora y la cinta de carga, de modo que el RAP pase por la criba mientras se coloca en la tolva de alimentación en frío.

El RAP no puede calentarse en el secador porque generará emisiones visibles de hidrocarburos (humo azul) al estar expuesto a los gases de escape de alta temperatura del quemador. Por lo tanto, la alimentación del RAP debe estar separada de la alimentación de los agregados nuevos. El RAP puede ingresar a la planta en uno de tres lugares principales después del secador: la base del elevador de material caliente, una de las tolvas calientes en la parte superior de la torre o la tolva de

pesaje, que es la ubicación preferida para la mayoría de las operaciones en plantas por lotes.

Adición de Cal Hidratada

La cal hidratada puede añadirse al agregado en una operación de mezcla estacionaria de dos maneras: puede aplicarse al agregado, en forma seca o en forma de lechada, de manera similar al método utilizado en una planta de mezcla continua (ver Secciones 9 y 10); o añadirse en forma seca al agregado, de manera similar a un relleno mineral. Si la cal hidratada se añade al agregado en forma de lechada, el agua de la lechada deberá eliminarse durante el proceso de secado dentro del secador de agregados. Esto incrementará tanto el costo del secado del agregado como reducirá la tasa de producción de la planta.

SISTEMA DE SUMINISTRO DE CEMENTO ASFÁLTICO

Tanques de almacenamiento

El tanque de almacenamiento utilizado para el cemento asfáltico en una operación de planta por lotes es el mismo que se utiliza en una planta de mezcla continua. El material generalmente se almacena a temperaturas entre 149°C y 177°C (300°F y 350°F), dependiendo del grado o viscosidad del cemento asfáltico. El material ligante debe ser lo suficientemente fluido como para mezclarse adecuadamente con el agregado en el mezclador.

Sistema de bombeo

El contenido de asfalto en la mezcla se determina por peso, no por volumen (excepto en unas pocas plantas estacionarias antiguas). Por lo tanto, no se utiliza un medidor para dosificar la cantidad de cemento asfáltico necesaria en la mezcla. La bomba, que opera de manera continua, extrae el cemento asfáltico del tanque de almacenaje y lo entrega al balde de pesaje o lo recircula al tanque, dependiendo de la apertura de la válvula de control en el balde de pesaje. Cuando la válvula está abierta hacia el balde de pesaje, el material ligante se bombea al balde hasta alcanzar el peso correcto. En ese momento, la válvula se cierra y el cemento asfáltico se recircula de nuevo al tanque de almacenaje.

Adición de aditivos líquidos antiestriación

Los aditivos líquidos antiestriación se añaden al cemento asfáltico en la planta de mezcla estacionaria de manera similar a como se hace en una planta de mezcla en tambor. El aditivo puede mezclarse con el cemento asfáltico a medida que este material se bombea desde el vehículo de entrega o desde el tanque de almacenamiento hasta la tolva de pesaje.

Alternativamente, puede mezclarse con el cemento asfáltico en el tanque de almacenamiento circulando los dos materiales juntos durante un período de tiempo antes de que el material tratado se bombee a la tolva de pesaje del cemento asfáltico.

CALENTAMIENTO Y SECADO DEL AGREGADO

El secador en una planta estacionaria convencional opera según un principio de contraflujo. Su funcionamiento es similar al de una planta de mezcla en tambor de contraflujo (aunque, dado que el secador de agregados estaba en uso antes de la moderna planta de mezcla en tambor de contraflujo, es más correcto decir que la planta de mezcla en tambor de contraflujo opera de manera similar a un secador de agregados convencional). El agregado se carga en el secador en el extremo superior del tambor y fluye a través del secador por la acción de las paletas giratorias y la gravedad. El quemador está ubicado en el extremo inferior o de descarga. Los gases de escape se mueven hacia el extremo superior del secador, en contra de la dirección del flujo del agregado. Este proceso se muestra en la Figura 8-1.

El secador es un tambor rotativo que generalmente tiene un diámetro de 1,5 a 3,0 m (5 a 10 pies) y una longitud de 6 a 12 m (20 a 40 pies). La longitud del tambor es normalmente proporcional al diámetro en una proporción de 4:1. Por lo tanto, un secador con un diámetro de 2,4 m (8 pies) generalmente tendría una longitud de 9,7 m (32 pies).). La función del secador es eliminar la humedad del agregado y calentar el material

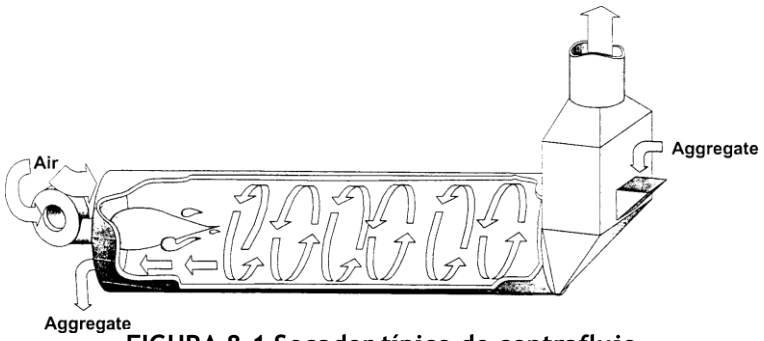


FIGURA 8-1 Secador típico de contraflujo.

a la temperatura de descarga deseada, generalmente en el rango de 138 °C a 163 °C (290 °F a 325 °F). El contenido de humedad del agregado al salir del secador debe ser inferior al 0,5 por ciento e idealmente inferior al 0,2 por ciento.

El agregado se alimenta al secador desde la cinta transportadora de carga mediante una tolva de carga en la parte superior del secador o, ocasionalmente, una cinta transportadora lanzadora en la parte inferior del secador. Las paletas dentro del secador, que se muestran en la Figura 8-2, se utilizan para levantar y volcar el material en un velo a través del diámetro del secador. A medida que el agregado fluye hacia abajo del secador, se calienta con los gases de escape del quemador y se elimina la humedad. La llama del quemador, que generalmente tiene una forma más larga y delgada que la llama corta y tupida del quemador en una planta de mezcla en tambor de flujo paralelo, se extiende hacia el secador para penetrar el velo de agregado. El agregado se calienta y seca con los gases de escape del quemador mediante conducción, convección y radiación. Debido a la mayor eficiencia del sistema de contraflujo, un secador de planta estacionaria típicamente usa menos combustible para calentar y secar una determinada cantidad de agregado que el tambor de mezcla en una planta de mezcla en tambor de flujo paralelo.

El tiempo de permanencia del agregado dentro del secador es función de la longitud del tambor, el diseño y número de paletas, la velocidad de rotación y la pendiente del secador [típicamente 2,5 a 6,0 grados, o 26 a 63 mm/m (5/16 a 3/4 pulgadas/pie)]. Si queda más del 0,5 % en el agregado al salir del secador, la densidad del velo de agregado dentro del tambor debe aumentarse, típicamente reduciendo la pendiente del secador o cambiando el número o tipo de paletas utilizadas en el secador. Ambos procedimientos

FIGURA 8-2 Velo adecuado

aumentarán el tiempo de permanencia del agregado dentro del secador, y ambos pueden ser difíciles y costosos de realizar. Debido a que el agregado generalmente constituye entre el 92 y el 96 por ciento del peso de la mezcla asfáltica, gobierna la temperatura de la mezcla producida en la mezcladora. El calentamiento excesivo del agregado puede causar un endurecimiento excesivo del cemento asfáltico en el proceso de mezcla. Sin embargo, si se va a producir una mezcla reciclada (como se analiza en una sección posterior), el agregado nuevo debe sobrecalentarse en el secador para lograr el intercambio de calor necesario en la mezcladora. En este caso, la temperatura requerida del nuevo agregado depende de la cantidad de RAP y su contenido de humedad.

TAMIZADO Y ALMACENAMIENTO DEL AGREGADO CALIENTE

Elevador Caliente

Nuevo Agregado

El agregado calentado y secado se descarga a través de una tolva hacia la parte inferior del elevador de cangilones. El material caliente es transportado por los cangilones en movimiento continuo hacia la parte superior de la torre de la planta estacionaria, como se ilustró anteriormente en la Figura 5-1. Desde el elevador caliente, el agregado se entrega a la criba en la parte superior de la torre.

RAP

Generalmente no es recomendable agregar el RAP a la planta en la parte inferior del elevador caliente, especialmente cuando la cantidad de RAP supera aproximadamente el 10% de la mezcla. El RAP debe alimentarse, si es posible, a la tolva de descarga del agregado nuevo desde el secador para que quede encima del agregado nuevo caliente y se dirija hacia el centro de los cangilones. Si eso no es factible, el material RAP debe depositarse en una tolva inclinada separada ubicada sobre la entrada del agregado nuevo en la parte inferior del elevador caliente. El RAP debe colocarse en los cangilones después del agregado nuevo para evitar que el material recubierto de asfalto se adhiera a los cangilones al calentarse por contacto con el agregado nuevo sobrecalentado.

Existe un límite a la cantidad de RAP que se puede alimentar en la parte inferior del elevador, que está relacionado con el proceso de calentamiento a medida que el material viaja hacia la parte superior de la torre. Dependiendo del porcentaje de RAP utilizado en la mezcla, el contenido de humedad del RAP y las condiciones ambientales, el material puede calentarse lo suficiente mientras viaja hacia arriba por el elevador de cangilones con el agregado nuevo como para adherirse a las cribas en lugar de pasar a través de ellas. El resultado puede ser el bloqueo (cegamiento) de las cribas y un cambio consecuente en la gradación del nuevo agregado en cada uno de los silos, ya que el material que debería estar en un silo dado pasa por encima de ese y termina en otro silo de gradación más gruesa. Si las cribas se obstruyen lo suficiente, puede resultar el cierre de la planta. Se recomienda que si se va a agregar más del 10% de RAP a la mezcla y si el RAP se va a introducir en la planta en la parte inferior del elevador, las cribas en la parte superior de la torre

deben ser eliminadas o descartadas. Si se hace esto, todo el agregado nuevo y recuperado se entregará al contenedorcaliente No. 1.

Tamices de pantalla

El agregado se descarga desde los cubos del elevador caliente sobre un grupo de tamices vibratorios que se utilizan para separar el material en diferentes tamaños. Normalmente se utilizan cuatro niveles de tamices, dispuestos como se muestra en la Figura 8-3. El tamiz superior generalmente es un tamiz de desbaste utilizado para eliminar cualquier material sobresaliente del flujo de agregado y desviarlo hacia un bypass o canal de desbordamiento. Los otros tres niveles de tamices dividen el agregado en cuatro fracciones diferentes. La cantidad de material en cada fracción depende del tamaño y la forma de las aberturas en los tamices. Cada nivel puede tener varios tamaños de tamiz diferentes para mejorar el cribado y proteger los tamices más pequeños del agregado de mayor tamaño.

Pueden tener aberturas cuadradas, rectangulares o ranuradas. Por ejemplo, en una planta típica de lote utilizada para fabricar mezclas de base, capa de ligante y capa superficial, las aberturas de un tamiz cuadrado podrían ser de 32 mm (1 1/4 in.) para el primer nivel, 14 mm (9/16 in.) para el segundo nivel, 8 mm (5/16 in.) para el tercer nivel y 4 mm (5/32 in.) para el nivel inferior. El agregado de tamaño arena, menor a 4 mm (5/32 in.) de diámetro, pasaría directamente a través de todos los tamices y se depositaría en el contenedor caliente No. 1. El agregado que fuera mayor a 4 mm (5/32 in.) pero no mayor a 8 mm (5/16 in.) sería transportado sobre el primer tamiz y luego caería en el contenedor caliente No. 2. Para cualquier mezcla particular, deben utilizarse los tamices adecuados en el nivel de tamices para producir la gradación requerida en la mezcla de asfalto. Si las gradaciones de

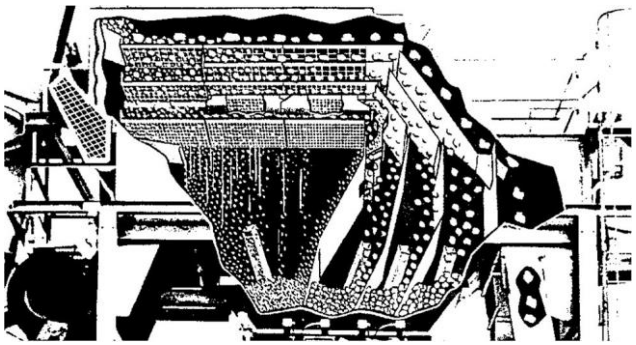


FIGURA 8-3 Ilustración en corte del proceso de detección

mezcla cambian significativamente, puede ser necesario cambiar los tamaños de tamiz utilizados en la parte superior de la torre de mezcla. Se pueden usar tamices de tamaños diferentes para diversas combinaciones de agregados, con el fin de cumplir con las especificaciones requeridas.

Muchos tamices usan una configuración de tamiz dividido, donde se colocan tamices con aberturas de dos tamaños diferentes en el mismo nivel. Por ejemplo, el nivel superior puede emplear un tamiz con una abertura de 8 mm (5/16 in.) para la mitad del nivel más cercana al elevador y un tamiz con una abertura de 32 mm (1 1/4 in.) para la mitad del nivel sobre los contenedores No. 3 y 4. Este arreglo mejorará la eficiencia de la operación de cribado.

No todo el material que debería estar en un contenedor individual termina en el mismo. El término "arrastre" se refiere al agregado más fino que no pasa por los tamices más grandes y se deposita en contenedores destinados a material de mayor tamaño. A menudo se encuentra una pequeña cantidad de arrastre, generalmente menos del 10 %, de un contenedor al contenedor adyacente. El arrastre es causa del flujo del agregado que se mueve a través en lugar de hacia los tamices. La cantidad de arrastre aumenta a medida que las aberturas de los tamices se obstruyen o tapan con agregado y a medida que la cantidad de agregado entregada por el elevador aumenta. El problema principal ocurre cuando la cantidad de arrastre varía con el tiempo, lo que hace que la gradación del agregado en cada uno de los contenedores cambie. Esta situación suele deberse a una variación continua en la tasa de alimentación del agregado desde los contenedores de alimentación en frío.

Además, si un tamiz tiene agujeros, parte del agregado que debería ser depositado en otro contenedor pasará a través del tamiz y terminará en un contenedor con material de tamaño más pequeño. Por tanto, los tamices en la parte superior de la torre deben ser revisados regularmente para asegurar que no haya agujeros y que no estén obstruidos con agregado. El análisis de las gradaciones de los contenedores ayuda a encontrar dónde existen agujeros. En algunas zonas, las plantas de lote operan comúnmente sin tamices; el nivel de tamices se retira o se usa un canal de desvío de tamices. Todo el agregado transportado por el elevador se deposita directamente en el contenedor No. 1. Sin tamices, la planta de lote se opera de manera similar a una planta de mezcla por tambor de flujo inverso, y la gradación final de la mezcla se determina por la consistencia de la gradación del agregado en los contenedores de alimentación en frío. Debido a que no se realiza un cribado para separar el agregado por tamaño, las gradaciones que se dosifican en los silos de alimentación en frío (a menos que solo se use una mezcla de agregado para hacer la mezcla) se depositan directamente en el contenedor No. 1 al descargarse del elevador caliente. Todo el agregado utilizado en la mezcla se extrae de este único contenedor hacia la tolva de pesaje y luego hacia el mezclador.

Contenedores calientes

Nuevo agregado

La capacidad total de los contenedores calientes generalmente es proporcional al tamaño del molino de amasado (pugmill). Sin embargo, la capacidad de cada uno de los contenedores calientes no es la misma. El contenedor No. 1 (arena) tiene la mayor capacidad. Generalmente, entre el 40% y el 50% del peso del agregado entregado por el elevador caliente pasa a través de los tamices y entra en este contenedor. La capacidad típica (porcentaje de la capacidad total de los contenedores calientes) de cada uno de los tres contenedores restantes es del 25% al 30% para el contenedor No. 2, del 15% al 20% para el contenedor No. 3, y del 10% para el contenedor No. 4. Algunos segregados del agregado ocurren en cada contenedor caliente, particularmente en el contenedor No. 1 (arena). Esta segregación es causada porque el material más fino en cada fracción de tamaño pasa más directamente a través de los tamices que el material más grueso de la misma fracción. Así, el agregado en el lado de cada contenedor caliente más cercano al elevador caliente generalmente tendrá una gradación más fina que el agregado en el lado opuesto del mismo contenedor caliente.

Las particiones entre los contenedores calientes deben ser revisadas regularmente para asegurarse de que no se hayan desarrollado agujeros y que el agregado de un contenedor no esté fluyendo hacia otro. Las tuberías de desbordamiento en la parte superior de cada contenedor deben estar abiertas. A veces, los finos se acumulan en las esquinas del contenedor No. 1. Cuando el nivel de agregado en el contenedor es bajo, los finos acumulados pueden desprenderse y un trozo de ese material puede ingresar a la tolva de pesaje. Si este es un problema continuo en una planta en particular, se pueden soldar piezas en las esquinas del contenedor No. 1 para reducir la acumulación de material fino, o se puede usar una placa en la parte superior del contenedor No. 1 para desviar los finos y dirigir ese material hacia el centro del contenedor. Aunque los tamices en la planta de lote se utilizan para recalificar el agregado que se alimenta en la planta desde los contenedores de alimentación en frío, la proporción de material entregado desde cada contenedor de alimentación en frío debe ser correcta, o uno de los contenedores calientes se quedará sin material o se desbordará. Debido a que todo el agregado que se descarga de los contenedores de alimentación en frío terminará en la mezcla, es muy importante que el agregado colocado en los contenedores de alimentación en frío esté gradado de manera consistente. No se deben usar los tamices para intentar resolver un problema con una gradación variable del agregado entrante, como se discutió anteriormente.

RAP

Aunque no se recomienda esta práctica, en la operación de algunas plantas de lote, el RAP (asfalto recuperado) se deposita directamente en uno de los contenedores calientes de la planta. Se utiliza un transportador de carga separado o un elevador de cubos para llevar el material recuperado a la parte superior de la planta. El RAP se deposita a través de un baipás de tamiz directamente en el contenedor No. 1 junto con la arena, o en el contenedor No. 4 si no hay otro agregado en ese contenedor (cuando se está produciendo una mezcla para la capa superficial y no se necesita agregado grande). Además, si el RAP se coloca en el contenedor No. 1, el proceso de transferencia de calor entre la arena sobrecalentada y el RAP a temperatura ambiente puede comenzar mientras ambos están juntos en ese contenedor caliente. Si el material recubierto de asfalto se coloca en el contenedor No. 4, no se obtiene ninguna ventaja de calor debido a la falta de agregado nuevo caliente en el contenedor. La desventaja de colocar el RAP en el contenedor No. 1 o en el contenedor No. 4 es que algunas de las partículas recubiertas con asfalto se pegarán a las paredes del contenedor. Esto puede ser un problema importante, particularmente si la cantidad de material recuperado utilizado en la mezcla y el contenido de humedad de ese material son altos. Si en el contenedor adyacente al RAP hay agregado nuevo sobrecalentado, una cantidad significativa de RAP se pegará a la partición entre los dos contenedores.

Tolva de Pesaje

Nuevo Agregado

Si se está produciendo una mezcla para la capa base, los cuatro contenedores calientes pueden llenarse con agregado. Si se está fabricando una mezcla para la capa de ligante o la capa superficial, normalmente solo se necesitarán dos o tres de los contenedores calientes. El agregado en los contenedores calientes puede descargarse en la tolva de pesaje en cualquier orden; sin embargo, generalmente el agregado grueso se descarga primero en la tolva de pesaje antes que el agregado fino. Esto se hace para evitar que las partículas más finas del agregado se filtren a través de las compuertas en la parte inferior de la tolva de pesaje si primero se vacía la arena (material del contenedor No. 1) en la tolva. Normalmente, se abre la compuerta en la parte inferior del contenedor caliente No. 3, y el agregado se descarga en la tolva de pesaje hasta que se alcanza el peso correcto. Luego se cierra la compuerta del contenedor No. 3, se abre la compuerta del contenedor caliente No. 2 y la tolva de pesaje se llena con ese material hasta que se alcanza el peso acumulado correcto (peso combinado del material de los contenedores No. 3 y No. 2). El

agregado en cada uno de los dos últimos contenedores calientes (No. 1 y No. 4) se agrega a la tolva de pesaje de la misma manera. El proceso de pesaje de cada agregado se realiza en aproximadamente 5 segundos. Es importante que el agregado entregado desde cada contenedor se deposite lo más cerca posible del centro de la tolva de pesaje, para que la tolva no quede desbalanceada en la báscula y evitar que se derrame el agregado. Si se necesita relleno mineral en la mezcla, se agrega al agregado que ya está en la tolva de pesaje. El relleno se entrega de forma neumática o mecánica desde un silo de almacenamiento a una pequeña tolva de retención, ubicada sobre la tolva de pesaje en la torre. Luego, se agrega a la tolva mediante un transportador de tornillo horizontal. En algunas plantas, el relleno se pesa por separado de los otros agregados y luego se introduce en la tolva del agregado principal después de que el agregado de los contenedores haya sido pesado. En otras plantas, el relleno se pesa como un quinto agregado mientras se agrega al material ya presente en la tolva.

La mayoría de las plantas de lote operan en modo automático o semiautomático. Los diferentes materiales de agregado que se mantienen temporalmente en los contenedores calientes se pesan uno a la vez. Si no hay suficiente agregado en un contenedor para alcanzar el peso requerido en la tolva, el sistema de pesaje espera hasta que haya suficiente agregado de ese tamaño antes de pesar el agregado del siguiente contenedor. Por lo tanto, para que la planta funcione de manera eficiente, es importante que las gradaciones adecuadas del agregado se entreguen de manera consistente a la planta desde los contenedores de alimentación en frío. A pesar de que la planta de lote está equipada con tamices, el control de la gradación del agregado debe lograrse en los contenedores de alimentación. Si la entrega de material desde los contenedores de alimentación no es consistente, uno o más de los contenedores calientes en la parte superior de la torre eventualmente se quedarán sin agregado, o bien otro contenedor contendrá demasiado material y se desbordará, o ambos. En tales casos, podría existir la tendencia de que el operador de la planta cambie al modo de procesamiento manual y vuelva a equilibrar el flujo de agregado agregando o restando ciertos tamaños de agregado de la mezcla de agregado durante un corto período de tiempo. Este procedimiento, por supuesto, cambia la gradación del agregado en la mezcla de HMA.

RAP

La ubicación más común para agregar RAP en una planta de lote es en la tolva de pesaje. Una vez que el agregado de los contenedores calientes ha sido depositado en la tolva y pesado, el material recuperado generalmente se introduce en la tolva como un quinto agregado (o un sexto agregado, si se utiliza relleno mineral en la mezcla), aunque en realidad se puede agregar en cualquier orden, excepto primero. El transportador de carga utilizado para entregar el RAP a la tolva de pesaje, como se mostró anteriormente en la Figura 5-2, debe ser de mayor tamaño en este caso, ya que no funciona de manera continua. El RAP debe ser depositado en la tolva de pesaje en aproximadamente 5 segundos. El RAP debe descargarse desde el transportador de carga en una tolva inclinada empinada y luego hacia el centro de la tolva de pesaje. El ángulo pronunciado evita que el RAP se acumule en la tolva. Si este material se deposita en un lado de la tolva de pesaje, de modo que la tolva quede desbalanceada, no se determinará un peso exacto. La tolva de carga debe estar equipada con una compuerta de caída para evitar que el polvo fugitivo se escape del área de la tolva de pesaje cuando el agregado se vacíe en el mezclado.

Mezcla de Agregado y Cemento Asfáltico

El agregado y el cemento asfáltico se mezclan en un pugmill de doble eje. Las palas de mezcla, que se muestran en la Figura 8-4, están unidas a dos ejes horizontales que rotan en direcciones opuestas. El agregado se descarga primero desde la tolva de pesaje en el mezclador por un breve período de tiempo antes de que el cemento asfáltico se introduzca en el pugmill y comience el tiempo de mezcla húmeda. Cuando la mezcla se ha completado, la mezcla asfáltica se descarga del pugmill directamente en un camión de transporte o en el dispositivo de transporte hacia el silo.

Capacidad del Pugmill

El tamaño de la mezcla producida depende del tamaño del pugmill. Algunas plantas de lote tienen una capacidad de pugmill tan pequeña como 0.9 toneladas (1 tonelada). Sin embargo, el pugmill de la mayoría de las plantas de lote tiene una capacidad de entre 1.8 y 4.5 toneladas (2 a 5 toneladas).

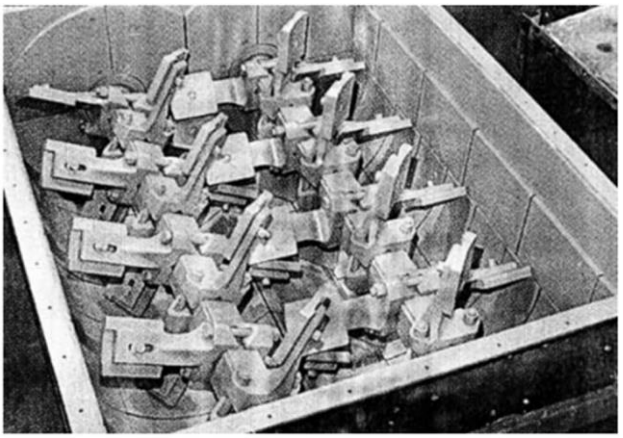


FIGURA 8-4 Interior del mezclador pugmill.

Una de las mezcladoras tipo pugmills de planta estacionaria más grandes fabricados puede mezclar 10,4 toneladas o 10 400 kg (11,5 toneladas o 23 000 libras) de mezcla en un solo lote. El tiempo total de mezcla para los diversos tamaños de lote es el mismo, típicamente tan corto como 35 segundos por lote. La única diferencia es el tamaño de cada lote, no el tiempo necesario para producirlo.

La capacidad nominal de la mezcladora pugmill se determina por las dimensiones de la zona activa. Si se coloca demasiados agregados en la mezcladora, el material por encima de las puntas de las palas tenderá a quedarse en la parte superior y no se mezclará con el resto del agregado. Si se deposita muy poco agregado en la mezcladora, el material será lanzado alrededor y hacia el aire por las palas, en lugar de mezclarse. Estas dos condiciones se ilustran en la Figura 8-5.

El tamaño del lote no debe variar de un lote a otro; un tamaño de lote constante es clave para una mezcla consistente. El enfoque óptimo es seleccionar un tamaño de lote igual o ligeramente inferior a la capacidad nominal de la mezcladora pugmill y producir todos los lotes con ese tonelaje. Si la planta está equipada con una mezcladora de 2,7 toneladas (3 toneladas) y los camiones de transporte promedio pueden cargar 12,5 toneladas (14 toneladas) de mezcla, el tamaño del lote seleccionado debería ser de 2,5 toneladas (2,8 toneladas) [12,5 toneladas (14 toneladas) por camión, divididas en cinco lotes]. El operador de la planta no debería intentar producir cuatro lotes de 2,7 toneladas (3 toneladas) cada uno y un quinto lote de solo 1,8 toneladas (2 toneladas).

RAP

El reciclaje con la mezcladora tipo pugmill está ganando popularidad. Al agregar una tolva de pesaje adicional a la planta por lotes, el RAP se transporta y pesa en su propia tolva mientras el asfalto y los agregados vírgenes se pesan simultáneamente. Los mismos límites prácticos, de transferencia de calor y liberación de vapor se aplican a este enfoque, tal como ocurre con el método de caja de pesaje en el reciclaje de plantas por lotes, como se muestra en la Figura 8-6. Las ventajas de este método incluyen lo siguiente:

- Durante largas series de producción de pavimento reciclado, se puede lograr un aumento en la tasa de producción por hora debido al ciclo de lote ligeramente más corto.
- Hay menos desgaste en los equipos debido a los arranques y paradas abruptas.
- El proceso de pesaje puede realizarse de manera más lenta y precisa con una tolva de pesaje independiente que no se ve afectada por la liberación instantánea de vapor.

Típicamente, se utiliza un transportador rápido tipo Slinger para llevar el RAP desde la tolva de pesaje hasta la mezcladora pugmill. También se puede emplear un chute o un transportador de tornillo rápido.

Tiempo de mezcla

Tiempo de mezcla en seco

El tiempo de mezcla en seco comienza cuando se inicia la carga de los agregados en la mezcladora tipo pugmill y termina cuando se inicia la inyección de asfalto. El tiempo de mezcla en seco debe ser mínimo, normalmente no más de 1 o 2 segundos. Aunque el agregado en la tolva de pesaje está dispuesto en capas, los agregados de diferentes tamaños pueden mezclarse adecuadamente durante el ciclo de mezcla en húmedo y no necesitan premezclarse durante el ciclo de mezcla en seco. El propósito principal del tiempo de mezcla en seco es permitir que algo de agregado entre a la mezcladora pugmill antes de que se descargue el cemento asfáltico, evitando que el cemento líquido se derrame por las compuertas en la parte inferior de la mezcladora.

Aumentar el tiempo de mezcla en seco reduce la tasa de producción de la planta sin aportar beneficios a la mezcla y provoca un desgaste innecesario en las palas y los revestimientos de la mezcladora pugmill. Además, cualquier aumento en el tiempo de mezcla en seco incrementa el costo de producción de la mezcla. Por lo tanto, el tiempo de mezcla en seco debe mantenerse lo más corto posible; normalmente, 1 segundo es suficiente.

Tiempo de mezcla en húmedo

Mientras el agregado aún se está descargando de la tolva de pesaje hacia la mezcladora tipo pugmill, comienza la adición del cemento asfáltico. Este material se introduce en la mezcladora por gravedad o por aspersión a presión y se agrega ya sea a través de un tubo en el centro de la mezcladora o a través de dos tubos, uno sobre cada uno de los dos ejes de mezcla. El tiempo de mezcla en húmedo comienza cuando el asfalto entra a la mezcladora pugmill. Generalmente, se requieren entre 5 y 10 segundos para que todo el cemento asfáltico sea descargado de la tolva de pesaje. Los sistemas de inyección a presión pueden utilizarse para reducir este tiempo.

El tiempo de mezcla en húmedo no debe ser mayor al necesario para cubrir completamente el agregado con el cemento asfáltico. Si las puntas de las palas y los revestimientos de la mezcladora pugmill están en buenas condiciones y si está lleno, el tiempo de mezcla en húmedo puede ser tan corto como 27 segundos. Si las puntas de las palas están desgastadas, el tiempo de mezcla en húmedo se extenderá algo más, pero

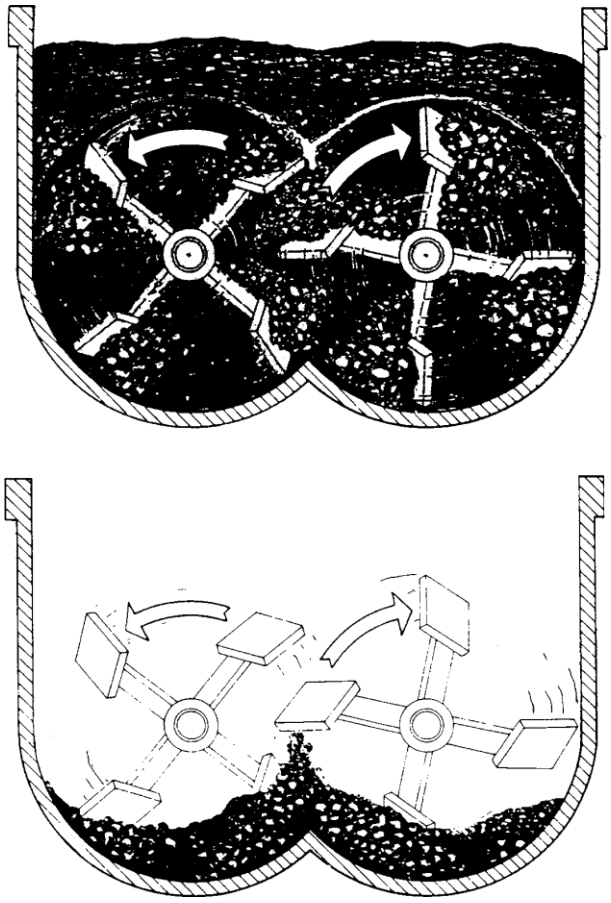


FIGURA 8-5 Mezcladoras sobrecargadas y subcargadas.

normalmente no debería exceder los 33 segundos. Dado que la condición de las puntas de las palas afecta el tiempo de mezcla en húmedo, estas deben revisarse regularmente y reemplazarse cuando sea necesario. Como regla general, un tiempo de mezcla en húmedo de 30 segundos es más que suficiente para distribuir uniformemente el cemento asfáltico y cubrir el agregado.

El tiempo de mezcla debe ser lo más corto posible para evitar el endurecimiento excesivo del cemento asfáltico en una película delgada alrededor de las partículas de agregado, debido a la exposición a altas temperaturas. El tiempo de mezcla en húmedo necesario puede determinarse utilizando el procedimiento de conteo de Ross para evaluar el grado de recubrimiento de las partículas de agregado grueso en la mezcla, según lo establecido en la norma ASTM D2489. Una vez que el cemento asfáltico se ha distribuido adecuadamente, un tiempo adicional de mezcla en húmedo no mejora el grado de recubrimiento, sino que oxida (endurece) el cemento asfáltico al exponer el material aglutinante al aire de manera continua.

En una mezcladora tipo pugmill, el recubrimiento del agregado comienza primero con las partículas de menor tamaño. Si la mezcla en húmedo se realiza solo durante 10 segundos y el material se descarga del pugmill al final de ese tiempo, generalmente solo las partículas más pequeñas de agregado fino (material que pasa por los tamices de 0,600 mm o 0,425 mm, No. 30 o No. 40) estarán recubiertas con cemento asfáltico; las partículas de agregado más grueso estarán solo parcialmente recubiertas. Si el tiempo de mezcla en húmedo se extiende a 20 segundos y el material se descarga al final de ese tiempo, solo el agregado que pasa por el tamiz de 4,75 mm (No. 4) y menor estará típicamente recubierto con cemento asfáltico; las partículas de agregado más grueso permanecerán sin recubrir. El recubrimiento completo de todo el agregado grueso en la mezcla generalmente requiere entre 26 y 28 segundos de mezcla en húmedo en una mezcladora pugmill con las puntas de las palas y el revestimiento en buenas condiciones. Por lo tanto, el procedimiento de conteo de Ross, que evalúa únicamente el grado de recubrimiento de asfalto en las partículas de agregado grueso (mayores que el tamiz de 4,75 mm, No. 4), es una manera efectiva de determinar el tiempo mínimo necesario de mezcla en húmedo para distribuir el cemento asfáltico correctamente en todo el agregado.

Tiempo total de mezcla

El tiempo de mezcla tiene un efecto directo en la capacidad de producción de una planta. Si se utiliza un

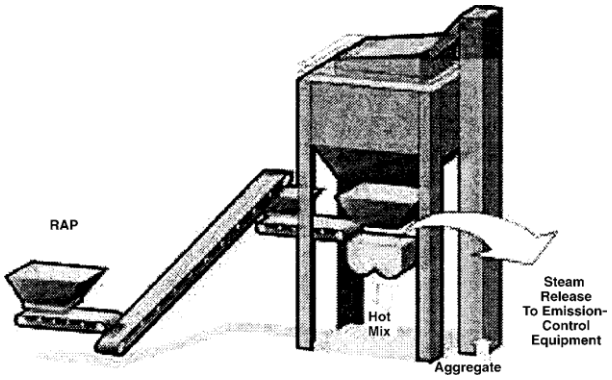


FIGURA 8-6 Método de caja de pesaje para el reciclaje en plantas por lotes.

tiempo de mezcla en seco de 1 segundo y un tiempo de mezcla en húmedo de 27 segundos, la mezcla adecuada de los dos materiales puede lograrse en 28 segundos. Considerando aproximadamente 7 segundos adicionales para abrir las compuertas en la parte inferior de la mezcladora tipo pugmill, descargar la mezcla y cerrar las compuertas, el tiempo total de ciclo necesario para producir un lote de HMA es de 35 segundos. Este tiempo es el mismo independientemente de si el tamaño del lote es de 1,8 toneladas (2 toneladas) o 4,5 toneladas (5 toneladas). Teóricamente, si una planta con una capacidad de mezcladora pugmill de 4,5 toneladas (5 toneladas) se opera de manera continua durante 1 hora, se pueden fabricar 465 toneladas (514 toneladas) de mezcla asfáltica.

Si las especificaciones requirieran un tiempo de mezcla en seco de 5 segundos y un tiempo de mezcla en húmedo de 35 segundos, el tiempo total del ciclo para producir la mezcla sería de 47 segundos (asumiendo 7 segundos para abrir las compuertas, descargar la mezcla y cerrarlas). Este tiempo de ciclo aumentado (47 segundos comparado con 35 segundos) reduciría la cantidad de mezcla producida en una mezcladora pugmill con una capacidad de 4,5 toneladas (5 toneladas) de 465 toneladas (514 toneladas) a 348 toneladas (383 toneladas) por hora. Si se utilizara un tiempo total de ciclo de 60 segundos, la tasa de producción de la misma planta se reduciría a solo 270 toneladas (300 toneladas) por hora. Por lo tanto, los tiempos de mezcla en seco y húmedo tienen un efecto significativo en la cantidad de mezcla producida por una planta determinada y en el costo de producir esa mezcla.

Si la planta no está equipada con un silo, habrá momentos en que la producción de la planta podría interrumpirse debido a la falta de camiones disponibles para el transporte. Este problema debe ser monitoreado por el operador de la planta. En ningún caso se debe extender el tiempo de mezcla de la planta durante el ciclo de mezcla en húmedo. Si se ha añadido el cemento asfáltico al agregado y el tiempo de mezcla en húmedo se extiende a 40 o 50 segundos o más, se producirá un endurecimiento excesivo del cemento asfáltico. Este tiempo de mezcla en húmedo extendido puede ser altamente perjudicial para el desempeño a largo plazo de la mezcla en la carretera.

Si no hay camiones disponibles, la planta debe permanecer en reposo sin material en la mezcladora tipo pugmill: las palas deberían estar "mezclando aire". La segunda opción, mucho menos deseable, es dejar la planta esperando durante el tiempo de mezcla en seco; el agregado está en la mezcladora, pero el cemento asfáltico no se ha añadido. Esto solo puede hacerse por un breve período de tiempo; de lo contrario, podría ocurrir una descomposición excesiva del agregado. Nuevamente, la planta no debe permanecer en reposo durante el tiempo de mezcla en húmedo.

Varios factores pueden reducir el suministro de agregado entrante, como un alto contenido de humedad o una capacidad insuficiente de tamizado, lo que prolonga el tiempo de secado. La tasa de producción de la planta se reducirá (el tiempo total de ciclo aumentará) mientras se espera por el agregado seco. Si ocurre este problema, el operador de la planta no debe aumentar el tiempo total de ciclo extendiendo arbitrariamente el tiempo de mezcla en húmedo. En cambio, el tiempo total de ciclo debe incrementarse retrasando la descarga del agregado desde la tolva de pesaje hacia la mezcladora pugmill, de manera que se "mezcle aire" en lugar de agregado (tiempo de mezcla en seco aumentado) o mezcla asfáltica (tiempo de mezcla en húmedo aumentado).

PRODUCCIÓN DE MEZCLA RECICLADA

Variables del Reciclaje

La cantidad de RAP reciclado en una mezcla depende de la temperatura del agregado nuevo y su contenido de humedad. Para transferir calor al RAP a temperatura ambiente, el agregado debe ser calentado, excediendo la temperatura necesaria para producir una mezcla asfáltica caliente (HMA). La transferencia de calor en el

elevador caliente, en los contenedores calientes y en la tolva de pesaje o en la mezcladora, dependiendo de dónde se introduzca el RAP en la planta. Para la mayoría de los secadores, la temperatura máxima del agregado nuevo al salir del secador debe ser de aproximadamente 260°C (500°F) para no reducir la vida útil del secador y evitar la expulsión de la humedad interna del agregado.

Las tres variables principales que determinan la temperatura a la que debe calentarse el agregado nuevo para lograr la transferencia de calor necesaria son el contenido de humedad del material reciclado, la temperatura de descarga de la mezcla reciclada final y la cantidad de material reciclado utilizado. Dependiendo de los valores de estas variables, se puede mezclar hasta un 50 por ciento de RAP con el agregado nuevo para fabricar un HMA reciclado. Muy raramente, sin embargo, es factible usar esa cantidad de RAP en una mezcla de HMA producida en una planta de procesamiento por lotes.

Contenido De Humedad

A medida que aumenta el contenido de humedad del material reciclado, la temperatura requerida para el agregado nuevo aumenta significativamente. Esto se ilustra en la Tabla 8-1. Si se utiliza un 20 por ciento de RAP en la mezcla, si el contenido de humedad de ese material es del 1 por ciento y si la temperatura de descarga requerida de la mezcla es de 127°C (260°F), la temperatura a la que debe calentarse el agregado nuevo es de 177°C (350°F), como se observa en la Sección B de la tabla. Sin embargo, si el mismo RAP tiene un contenido de humedad del 4 por ciento, la temperatura del agregado nuevo debe incrementarse a 199°C (390°F) para la misma cantidad de material reciclado y la misma temperatura de descarga de la mezcla.

Temperatura de Descarga de la Mezcla

Usando la Sección C de la Tabla 8-1 como ilustración, la cantidad de RAP incorporada en la mezcla es del 30 por ciento. Si el contenido de humedad de este material es del 3 por ciento al ser entregado a la planta, la temperatura del agregado nuevo debe ser al menos 196°C (385°F) cuando la temperatura de descarga de la mezcla es solo 104°C (220°F). Sin embargo, si la temperatura de descarga es de 138°C (280°F), la temperatura del agregado nuevo debe incrementarse a 246°C (475°F). Por lo tanto, una temperatura de descarga más alta para la mezcla reciclada proveniente de la mezcladora requiere un aumento en la temperatura del agregado nuevo desde el secador.

Cantidad de RAP

A medida que aumenta la cantidad de RAP en la mezcla reciclada, la temperatura del agregado nuevo también debe incrementarse. Si solo se utiliza un 20 % de RAP y si el contenido de humedad de ese material tiene un 4 por ciento de humedad para una temperatura de descarga de mezcla de 138°C (280°F), la temperatura de descarga del agregado nuevo debe ser de 213°C (415°F), según lo determinado en la Sección B de la Tabla 8-1. Al aumentar la cantidad de RAP al 50 por ciento, usando la Sección E de la tabla y para el mismo valor de contenido de humedad (4 por ciento) y temperatura de descarga de la mezcla [138°C (280°F)], la temperatura del agregado nuevo debe elevarse a 405°C (760°F) para lograr el proceso de transferencia de calor. Esta última temperatura supera significativamente la temperatura máxima recomendada para el agregado nuevo de 260°C (500°F).

Operación del Secador

Si la temperatura del agregado nuevo al salir del secador excede aproximadamente 260°C (500°F), el costo de operar y mantener el secador puede aumentar significativamente. Debido a las temperaturas extremadamente altas del agregado y al volumen reducido de agregado en el secador cuando se utiliza un gran porcentaje de RAP en la mezcla reciclada en comparación con una mezcla normal, el velo de agregado dentro del secador típicamente no será adecuado. Esta falta de velo aumentará la temperatura de la carcasa del secador y puede requerir un mantenimiento adicional en el interior del secador, especialmente en las aletas de descarga.

Si la producción de la mezcla se detiene durante un período prolongado debido a la falta de camiones de transporte o problemas mecánicos, el agregado nuevo sobrecalentado permanecerá en la parte inferior del secador. Si la temperatura de este material es superior a aproximadamente 260°C (500°F), puede producirse una deformación de la carcasa del tambor, y el secador perderá su forma circular.

Además, al final de cada ciclo de producción, se debe permitir que el secador funcione vacío con el ventilador de extracción operando durante un período razonable de enfriamiento después de la detención del suministro de agregado. Este procedimiento de enfriamiento protegerá contra posibles deformaciones de la carcasa del secador y de las aletas.

TABLA 8-1: Temperatura Requerida del Agregado

B. Proporción: 20% RAP / 80% Agregado	Temperatura de Descarga de la Mezcla Reciclada, °F			
	220°F	240°F	260°F	280°F
A. Proporción: 10% RAP / 90% Agregado				
0	250	280	305	325
1	260	290	310	335
2	270	295	315	340
3	280	300	325	345
4	285	305	330	350
5	290	315	335	360
B. Proporción: 20% RAP / 80% Agregado				
0	280	310	335	360
1	295	320	350	375
2	310	335	360	385
3	325	350	375	400
4	340	365	390	415
5	355	380	405	430
C. Proporción: 30% RAP / 70% A regado				
0	315	345	375	405
1	335	365	395	425
2	360	390	420	450
3	385	415	445	475
4	410	440	470	500
5	435	465	495	525
D. Proporción: 40% RAP / 60% A regado				
0	355	390	425	460
1	390	425	460	495
2	425	460	495	530
3	470	500	535	570
4	500	535	570	610
5	545	575	610	645
E. Proporción: 50% RAP / 50% Agregado				
0	410	455	495	540
1	465	515	550	590
2	520	580	605	650
3	575	620	660	705
4	640	680	715	760
5	690	735	775	820

NOTA: En estos cálculos se asume una pérdida de 20°F entre el secador y la mezcladora.
Conversión: °C = (°F − 32) / 1.8.
FUENTE: National Asphalt Pavement Association, *Hot Recycling in Hot Mix Batch Plants (IS-71)*, página 2.

Emisiones Visibles

Cuando el RAP se deposita sobre el agregado nuevo sobrecalentado en la tolva de pesaje y cuando ambos materiales se mezclan en la mezcladora, pueden producirse emisiones tanto de humedad como de polvo. Estas emisiones son causadas por la liberación de humedad, en forma de vapor, del RAP. La cantidad de vapor de humedad, así como de humo azul, liberada puede ser bastante grande. Para una mezcla que contiene un 50 por ciento de material reciclado en un lote de 2.7 toneladas (3 toneladas) de mezcla reciclada, con un contenido de humedad del 3 por ciento, se liberarán 40 kg (90 lb) de agua, que se convertirán en aproximadamente 422 m³ (14,900 ft³) de vapor de agua en unos 5 segundos. Esta liberación de vapor usualmente produce polvo a causa del transporte de partículas de polvo desde la tolva de pesaje y las áreas del mezclador.

Una forma de controlar las emisiones de partículas es reducir la cantidad de humedad o reducir la c

cantidad de RAP utilizada en la mezcla reciclada, o ambas. El contenido de humedad del material recuperado se puede mantener bajo al no triturar este material hasta justo antes de que se necesite y manteniendo el RAP bajo un techo para evitar que la lluvia lo moje. Otro enfoque común es ventilar adecuadamente la tolva de pesaje y el mezclador pugmill hacia el sistema de control de emisiones de la planta. (Consulte también la discusión sobre el control de emisiones en la Sección 12).

CARGA EN CAMIÓN O SILO

Si la mezcla descargada del mezclador pugmill se carga directamente en el camión de transporte, cada lote debe depositarse en un lugar diferente del camión. El primer lote debe colocarse en la parte delantera de la caja del camión. Luego, el conductor debe mover el camión hacia adelante para que el segundo lote se deposite en la sección trasera de la caja, o a la compuerta trasera. Los lotes restantes deben descargarse en el centro de la caja, cambiando la posición del camión debajo del mezclador para cada lote.

Este proceso minimizara la distancia que las partículas de agregado grueso pueden rodar en la caja, reduciendo así la posibilidad de segregación de la mezcla. Si la mezcla se va a almacenar temporalmente en un silo, debe descargarse desde el mezclador pugmill hacia el centro de una tolva y luego a un dispositivo de transporte, que puede ser un transportador de rastras, una banda transportadora o un elevador de cangilones. El silo debe operarse de manera similar al silo utilizado en una planta de mezcla continua (ver Secciones 9 y 10; consulte también la discusión sobre silos y técnicas de carga de camiones en la Sección 11).

CONTROL DE EMISIONES

Debido a que el cemento asfáltico no se añade al agregado dentro del secador, la cantidad de polvo transportado desde el secador de una planta de producción por lotes es generalmente mayor que la de un mezclador de tambor de flujo paralelo. Sin embargo, el funcionamiento del equipo de control de emisiones ya sea un sistema de depuración húmeda o un filtro de mangas (filtro de tela), es el mismo independientemente del tipo de planta utilizada.

Si los finos del filtro de mangas se reincorporan a la mezcla, deben ser alimentados a un sistema dosificador de relleno antes de ser introducidos en la tolva de pesaje en la torre. Este procedimiento garantiza que los finos del filtro se incorporen de manera uniforme a la mezcla. En algunas plantas, los finos se transportan al fondo del elevador en caliente y se depositan sobre el nuevo agregado descargado del secador. Mientras los finos se incorporen de manera consistente, este método de retorno de finos es aceptable, especialmente si el agregado pasa por la criba. Sin embargo, si no se utilizan cribas, pequeños grumos de finos pueden depositarse en el compartimiento caliente No. 1 y posiblemente acabar en la mezcla sin descomponerse. Por lo tanto, devolver los finos del filtro al elevador en caliente probablemente no sea tan recomendable como colocarlos directamente en la tolva de pesaje.

Si la planta está equipada con un filtro de mangas y se está produciendo una mezcla asfáltica reciclada con un alto porcentaje de RAP, la temperatura de los gases de escape del secador hacia el filtro debe ser monitoreada continuamente para asegurar que las bolsas del filtro de tela no se dañen por calor excesivo. Cuanto mayor sea la temperatura a la que se debe calentar el nuevo agregado, mayor será la probabilidad de que surjan problemas con el funcionamiento del filtro de mangas. (Consulte la Sección 12 para una discusión completa sobre el control de emisiones).

CALIBRACIÓN

El procedimiento de calibración para una planta de producción por lotes implica verificar la precisión de las básculas, tanto para la tolva de pesaje del agregado como para el cubo de pesaje del cemento asfáltico. Esto generalmente se realiza añadiendo una cantidad conocida de peso a cada báscula y leyendo el peso mostrado en el dial de la báscula. Para este propósito, normalmente se utiliza un conjunto de diez pesas de 22.6 kg (50 lb). La báscula de agregados se descarga y se ajusta a una lectura de cero. Las diez pesas de 22.6 kg (50 lb) se cuelgan de la báscula, y se registra la lectura en el dial. Las pesas se retiran y se añaden 226 kg (500 lb) de agregado a la tolva de pesaje. Las diez pesas se vuelven a colgar de la báscula, y se registra la siguiente lectura en el dial [452 kg (1,000 lb)]. Las pesas se retiran nuevamente, y se añaden 226 kg (500 lb) adicionales de material. Las pesas se colocan nuevamente en la báscula, y se registra la siguiente lectura en el dial [678 kg (1,500 lb)]. Este proceso continúa [añadiendo las pesas, registrando la lectura en el dial, retirando las pesas, añadiendo 226 kg (500 lb) de agregado a la tolva de pesaje, y luego repitiendo la secuencia] hasta que se alcance la capacidad de la báscula de agregados.

El mismo proceso se utiliza para el cubo de pesaje del cemento asfáltico, excepto que típicamente se usa solo una pesa de 22.6 kg (50 lb). Primero, el cubo de pesaje se descarga y la báscula se ajusta a una lectura de cero. A continuación, se cuelga una pesa de 22.6 kg (50 lb) de la báscula, y se registra la lectura en el dial. Luego, se introduce cemento asfáltico hasta alcanzar un peso de 22.6 kg (50 lb) en el cubo de pesaje. La pesa de 22.6 kg (50 lb) se vuelve a colocar en la báscula, y se registra la nueva lectura en el dial. Se añade un peso adicional de 22.6 kg (50 lb) de cemento asfáltico al cubo de pesaje [para un total de 45.2 kg (100 lb)]. El procedimiento continúa [añadiendo la pesa, registrando la lectura en el dial, retirando la pesa, añadiendo 22.6 kg (50 lb) de cemento asfáltico, y luego repitiendo la secuencia] hasta que se alcance la capacidad de la báscula del cubo de pesaje de cemento asfáltico.

Para ambas básculas, se comparan las lecturas reales del dial después de añadir cada conjunto de pesas con las lecturas "teóricas" de la báscula. Si ambas lecturas coinciden (dentro de un margen del 0.5 %), la báscula está calibrada. Si las lecturas difieren en más de esa cantidad, la báscula debe ajustarse. Los ajustes se realizan utilizando los procedimientos proporcionados por el fabricante de la báscula.

RESUMEN

Los siguientes factores deberán ser considerados al momento de monitorear las operaciones de una planta de hormigón:

- El contenido de humedad del agregado cuando se lo retire de los secadores debe ser menor al 0.5 por ciento e idealmente menor al 0.2 por ciento.
- La cantidad del agregado arrastrado deun contenedor caliente al siguiente debe ser relativamente constante y generalmente menor al 10 por ciento. Cambios significantes en la cantidad del agregado arrastrado de un contenedor hacia el adyacente puede resultar en un cambio importante en la gradación del agregado en la mezcla asfáltica caliente (HMA) que se está produciendo.
- Las cribas deben ser revisadas con regularidad en busca de agujeros u obstrucciones.
- Las mezcladoras tipo pugmill deben ser operadas a su capacidad nominal. Ambos,la subcarga y sobrecarga de una mezcladora con agregados reducirá significativamente la eficiencia del proceso de mezclado. El tamaño de cada lote deberá ser consistente. Se deberá revisar periódicamente las puntas de las paletas y el revestimiento de la mezcladora para asegurar que estén en buenas condiciones.
- El tiempo de mezclado en seco para el agregado dentro de la mezcladora tipo pugmilldebe ser mínimo, normalmente, no más de 1 o2 segundos.
- El tiempo de mezclado húmedo para combinar el cemento asfaltico y el agregado no debe ser mayor al necesario para recubrir elagregado de manera adecuada y completa. Para la mayoría de las plantas de hormigón, eltiempo de mezclado húmedo puede durar alrededor de 27 segundos.
- Aumentar el tiempo de mezclado húmedo más allá del mínimo necesario para recubrir completamente las partículas del agregado grueso en la HMA incremente el envejecimiento (oxidación o endurecimiento) del material ligante, incrementa el desgaste de las mezcladoras pugmill, reduce la tasa de producción de la planta, e incremente el costode producción de la mezcla.
- El operador de la planta no debe ausentarse durante el mezclado húmedo y tampoco debe hacerlo durante el mezclado enseco. Cuando la planta está esperando por los camiones, no debe haber material en las mezcladoras pugmill; estas deben “mezclaraire”.
- El tiempo total del ciclo de mezclado para producir y descargar un lote de mezcla, independiente del tamaño de la mezcladora, puede (y generalmente debe) ser igual a 35 segundos.
- Si se introduce asfalto reciclado (RAP) en el fondo del elevador caliente, debecolocarse en la parte superior del materialnuevo sobrecalentado y no en el fondo de las cubetas.
- Si el material recuperado se carga en la tolva de pesaje, debe ser colocado en el centro de esta, para que de esta manera la tolvaeste en equilibrio y se pueda determinar el peso exacto.
- La temperatura a la cual el nuevo agregado se debe calentar para obtener una transferencia de calor adecuada hacia el material recuperado se encuentra en función ala cantidad de RAP usada en la mezcla reciclada, el contenido de humedad en el RAP,y la temperatura de descarga de la mezcla. Para prevenir un daño potencial al secador, el nuevo agregado no deberá ser calentado a una temperatura mayor a 260ºC (500ºF). Si la temperatura del nuevo agregado (como se observa en la Tabla 8-1) es mayor que este valor para la cantidad y contenido de humedad del RAP será necesario reducir el porcentaje de RAP añadido a la mezcla reciclada.

9 Plantas de Mezcla en Tambor de Flujo Paralelo

Esta sección se centra en el procesamiento del agregado y cemento asfaltico dentro de una planta de mezclado por tambor de flujo paralelo. Primero se revisan los métodos usados para introducir el agregado en el tambor, seguidos por la operación de un sistema de quemado y un proceso de tres pasos: calentado, secado y mezclado que le ocurre al agregado mientras baja por el tambor. Se enfatiza en la importancia de la capa de agregado a lo largo de toda la sección transversal del tambor. A continuación, se consideran los métodos para introducir el cemento asfáltico dentro de los tambores y sobre los agregados, así como los sistemas usados para entregar tanto el relleno mineral como las partículas de polvo finas (Baghouse fine) dentro del tambor. A continuación, se discute la adición del RAP dentro del tambor, principalmente por el uso de un sistema de alimentación dividida para el nuevo agregado y el RAP, seguido de información sobre los factores que afectan la tasa de producción de la planta. Finalmente, se analiza la relación entre la temperatura de descarga de la mezcla y la temperatura de los gases de escape mientras salen del tambor, esta información será usada para determinar la eficiencia de la transferencia de calor dentro del tambor de mezclado. Esta sección termina con un resumen de factores clave a considerar en un monitoreo de operación de una planta de mezclado por tambor de flujo paralelo.

ENTRADA DE AGREGADOS

Existen 2 maneras para introducir nuevos agregados desde la cinta transportadora. La primera es mediante una tolva de carga ubicada por encima del quemador. El agregado se entrega en una tolva inclinada y desciende por gravedad hacia el tambor. La tolva está angulada para alejar el agregado del contacto directo con la llama del quemador y dirigirlo hacia la parte trasera del tambor. También se puede depositar el agregado en una cinta transportadora tipo Slinger ubicada debajo del quemador. En algunas plantas, la velocidad de esta cinta se puede ajustar para que el agregado se deposite más lejos dentro del tambor, alejándose de la llama del quemador. Las figuras 9-1 y 9-2 muestran una alimentación rotativa y una cinta transportadora Slinger, respectivamente, para un tambor de flujo inverso.

SISTEMA DE QUEMADORES

El quemador calienta y seca el agregado. Los quemadores están clasificados mediante un Método de Clasificación de Quemadores Uniformes, el cual se basas en 8 criterios: (a) porcentaje de excedente de aire, (b) porcentaje de escape de aire, (c) porcentaje de perdida de caparazón, (d) temperatura de los gases de ventilación, (e) porcentaje de remoción de humedad del agregado, (f) temperatura de descarga de la mezcla, (g) uso de fueloil Nº2 y (h) calor especifico del agregado. La salida máxima para el quemador bajo estas condiciones se puede encontrar en la placa de clasificación adjunta a cada quemador, aunque las condiciones operativas reales pueden diferir de las utilizadas para clasificarlo.

Combustible

Los quemadores pueden usar diferentes combustibles con mínimos ajustes. Estos se clasifican en gaseosos, líquidos y sólidos. Los combustibles gaseosos incluyen gas natural y gas licuado de petróleo, mientras que los líquidos abarcan propano, butano, aceite combustible No. 2, aceites pesados (tipos 4 a 6) y aceites reciclados. Los sólidos incluyen carbón pulverizado y biomasa en pellets.

El combustible debe ser adecuado para una atomización completa durante la combustión.

El aceite combustible No. 2 no requiere precalentamiento porque su viscosidad es inferior a 100 segundos universales Saybolt (SSU). En contraste, los aceites pesados necesitan precalentarse para reducir su viscosidad y asegurar una combustión completa. Algunos aceites reciclados pueden ser útiles si están filtrados y libres de agua, pero aquellos contaminados con metales pesados o desechos peligrosos son poco eficientes.

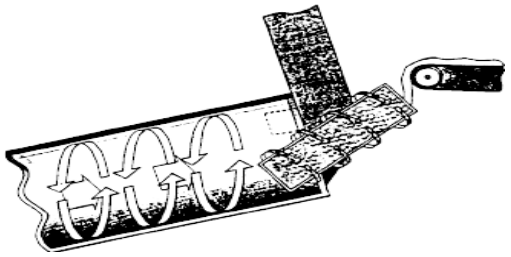


Figura 9-1 Tolva de carga rotativa típica para la entrega de agregado nuevo.

El combustible no quemado genera problemas como obstrucciones en las boquillas, mayor mantenimiento y riesgos en los sistemas de control de emisiones, incluyendo incendios en la casa de bolsas o contaminación de estanques de aguas residuales. Además, disminuye la cantidad de calor disponible, aumentando el consumo de combustible y los costos operativos. También puede alterar las propiedades del cemento asfáltico, reduciendo la viscosidad y afectando la rigidez y estabilidad de la mezcla producida.

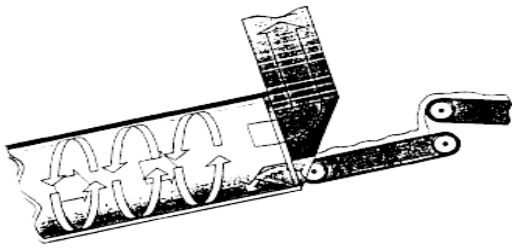


Figura 9-2 Cintas transportadoras tipo Slinger típicas para la entrega de agregados.

La combustión incompleta puede detectarse mediante dispositivos como el "ojo de llama", que supervisa el color de la llama, o por signos como sonidos irregulares en el quemador, manchas en las bolsas filtrantes o la presencia de aceite en sistemas de depuración húmedos.

Quemadores

La función primaria de los quemadores radica en mezclar las cantidades correctas de aire y combustible para obtener una combustión completa. Existen dos tipos principales de quemadores utilizados en el secado de agregados y mezclado de tambor: de flujo inverso o de flujo paralelo. Primero, muchas plantas están equipadas con un quemador que requiere que del 30 al 45 por ciento del aire necesario para la combustión sea forzado a través del quemador por un ventilador incorporado en el mismo. El 70 al 55 porciento restante del aire de combustión es aspirado por el ventilador de escape de laplanta hacia la zona de combustión alrededor del quemador. Este tipo de equipo - un quemador combinado de inducción y de soplado forzado - se muestra en la Figura 9-3.Algunos quemadores operan con todo el aire necesario para la combustión siendo forzado através del quemador por un ventilador. Este segundo tipo de quemador, mostrado en la Figura 9-4, se conoce como quemador de soplado forzado, de aire total o de 100 por ciento de aire. Estos últimos quemadores generalmente son mucho más silenciosos que el primer tipo y también más eficientes en el uso del combustible.

Algunos quemadores deben ser ajustados por el operador de la planta (a) a medida que cambia la cantidad de agregado dentro del secador o mezclador de tambor, (b) cuando aumenta o disminuye la cantidad de humedad en el agregado, y (c) cuando se cambia la temperatura de descarga del agregado para controlar el secado y calentamiento del material. La mayoría de los quemadores están equipados con un dispositivo automático que controla la entrada de combustible para mantener una temperatura de descarga relativamente constante para el agregado (o para la mezcla en un mezclador de tambor).

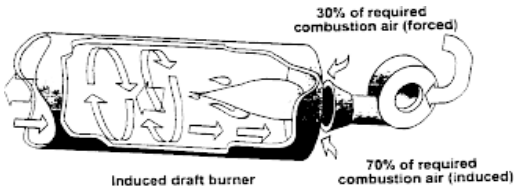


Figura 9-3 Quemador combinado de inducción y soplado forzado.

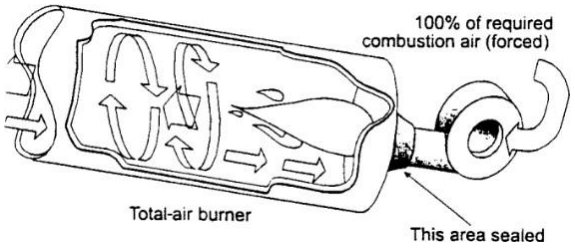


FIGURA 9-4: Quemador de tiro forzado, de aire total o al 100 por ciento.

Escasez de aire o combustible reducirá la eficiencia del quemador. Generalmente, la disponibilidad de aire es el factor limitante. El ventilador de purga, además de proporcionar el aire inducido, también debe extraer el vapor de humedad (vapor de agua) generado en el proceso de secado y los productos de la combustión a través del secador o mezclador de tambor. La capacidad de este ventilador es un factor determinante en el calentamiento y secado del agregado. El volumen de los gases de escape (aire, vapor de humedad y productos de combustión) extraídos por el ventilador es constante y depende de la configuración del regulador (damper) en el sistema.

La eficiencia del sistema también se ve afectada por fugas de aire. Dado que el ventilador extrae un volumen constante de gases de escape, a una configuración constante del regulador, cualquier aire que entre al sistema aguas abajo del quemador reduce la cantidad de aire secundario que el ventilador puede extraer. Es importante eliminar las fugas de aire para garantizar que el quemador reciba el volumen necesario de aire para lograr una combustión completa del combustible. Además, se debe instalar un regulador, operado manual o automáticamente, en los conductos para controlar la cantidad de aire que ingresa al sistema.

CICLO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Temperaturas dentro del tambor

La temperatura de la llama del quemador supera los 1400°C (2,500°F). Las temperaturas de los gases de salida en mezcladores de tambor de flujo paralelo suelen ser hasta 30°C (54°F) más altas que las temperaturas de la mezcla en la salida. Si las temperaturas de los gases de salida son superiores a este valor, podría ser un indicativo de un diseño inadecuado de las paletas internas, y se deben tomar medidas correctivas. Los perfiles típicos de temperatura para los gases de escape y el agregado a lo largo del tambor en sistemas de flujo paralelo y contraflujo se muestran en las Figuras 9-5 y 9-6. La diferencia entre las temperaturas de los gases de escape y la mezcla en la descarga representa la eficiencia del proceso de transferencia de calor y la cantidad de calor disponible para secar y calentar el agregado. La transferencia de calor perfecta en un tambor de flujo paralelo requeriría que las temperaturas de la mezcla descargada y de los gases de escape sean iguales en el punto en el que la mezcla se descarga de la planta.

Aunque se puede evaluar la eficiencia del proceso de transferencia de calor comparando las temperaturas de descarga de la mezcla y de los gases de escape al salir del tambor, a menudo es difícil medir con precisión la temperatura de los gases de escape en esa ubicación. Normalmente, ladiferencia de temperatura se mide en los conductos,en un punto entre el final del mezclador de tambor y la entrada de los gases de escape al equipo de control de emisiones. Este procedimiento se realizautilizando un termopar conectado a los conductos, aguas arriba del punto donde los gases de escape son conducidos al depurador húmedo o al sistema de filtro tipo bolsa. Para un funcionamiento eficiente del mezclador de tambor, la temperatura de los gases de escape antes de ingresar al sistema de control de emisiones debe estar dentro de 10°C (20°F) de la temperatura de descarga de la mezcla.

Generalmente, no es posible comparar directamente la temperatura de descarga de la mezcla con la de los gases de escape en el punto en el que estos salen de la chimenea de la planta. Si se utiliza un depurador húmedo, el agua empleada para capturar las partículas de polvo en los gases de escape enfriará naturalmente dichos gases. Además, tanto en los sistemas de control de emisiones con depuradores húmedos como en los de filtro tipo bolsa, cualquier aire que entre al sistema de conductos y equipo de control de emisiones entre el final del tambor y la chimenea reducirá la temperatura de los gases de escape antes de que salgan. Por lo tanto, las temperaturas de la mezcla descargada y de los gases de escape deben compararse en los conductos antes de que estos ingresen al sistema de control de emisiones.

Por ejemplo, si la temperatura de los gases de escape en los conductos es de 180°C (360°F) y la temperatura de descarga de la mezcla es de 140°C (280°F), probablemente el velo del agregado dentro del tambor es incompleto y el tambor está operando de manera ineficiente. Esto genera varios problemas, incluyendo un aumento en el consumo de combustible, la posible separación de partículas muy finas del resto del agregado en el tambor y un mayor deterioro de las bolsas del filtro si se utiliza un sistema de filtro tipo bolsa.

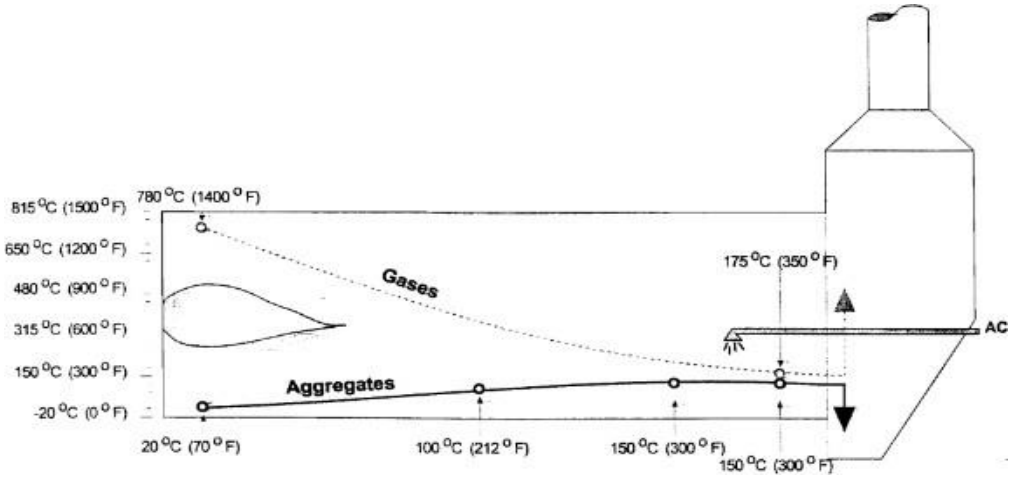


FIGURA 9-5: Perfil de temperatura para el secado de agregados en tambor de flujo paralelo

Además, la temperatura de los gases de escape debe controlarse en el punto donde se inyecta el cemento asfáltico. Dependiendo de la fuente del petróleo crudo y del proceso de refinación utilizado para producir el material, algunos cementos asfálticos pueden contener pequeñas cantidades de materiales volátiles o "componentes ligeros" que pueden evaporarse a temperaturas tan bajas como 330°C (600°F), e incluso a temperaturas mucho más bajas si hay presencia de humedad. Las emisiones visibles pueden evitar emisiones visibles si la temperatura de los gases de escape está por debajo de este valor en el punto donde el cemento asfáltico entra al tambor Las temperaturas de los gases de escape normalmente serán más altas cuando se produce una mezcla reciclada. Estas temperaturas más elevadas están relacionadas con la reducción de la densidad del velo de agregado aguas arriba del punto de entrada del RAP (asfalto reciclado) en la entrada rotativa central y la consiguiente reciclada, menor será la cantidad de agregado nuevo, y menos completo será el velo de material antes del punto de entrada del RAP. Para evitar la producción de emisiones visibles (humo azul) durante el reciclaje, la temperatura de los gases de escape debe estar por debajo aproximadamente 200°C (400°F) en el punto donde el RAP ingresa al tambor aproximadamente 200°C (400°F) en el punto donde el RAP ingresa al tambor.

Diseño de paletas

El agregado que se alimenta en el extremo del quemador del mezclador de tambor se mueve a lo largo del tambor mediante una combinación de flujo por gravedad y el levantamiento por las paletas internas mientras el tambor gira. Los factores que afectan el tiempo que tarda una partícula de agregado en atravesar el tambor incluyen la longitud y el diámetro del tambor, la inclinación del tambor,

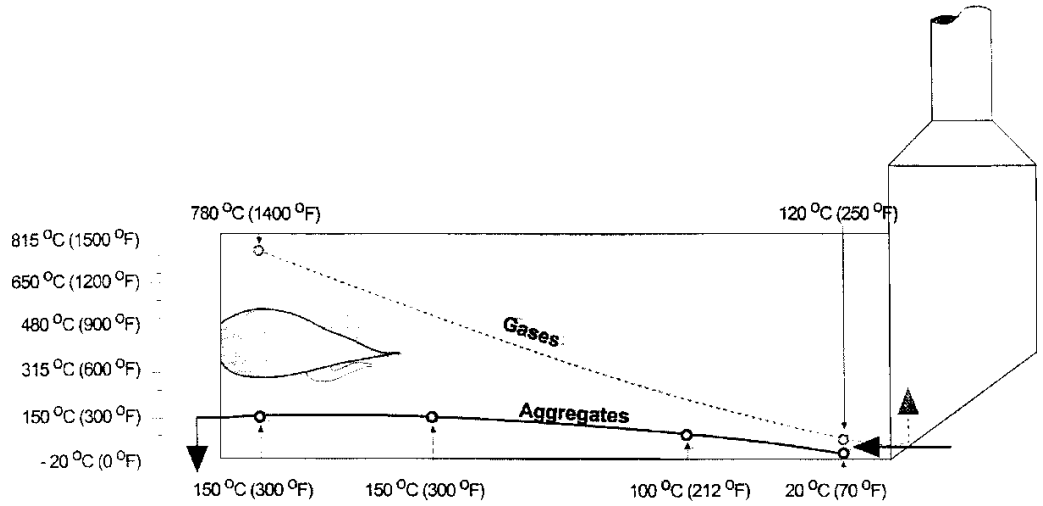


FIGURA 9-6: Perfil de temperatura para el secado de agregados en tambor de contraflujo

transferencia de calor menos eficiente. Cuanto mayor sea la cantidad de RAP utilizada en la mezcla el número y tipo de paletas dentro del tambor, la velocidad de rotación y el tamaño de las partículas

de agregado. En general, una partícula de agregado tarda entre 4 y 8 minutos en llegar al extremo de descarga del tambor.

Cada fabricante de plantas de tambor utiliza un diseño diferente en cuanto al patrón, forma, número y ubicación de las paletas dentro del tambor. Aunque se les da distintos nombres según el fabricante, las paletas utilizadas en las diferentes secciones del tambor generalmente cumplen los mismos propósitos: exponer el agregado al calor de los gases del quemador sin que caiga directamente a través de la llama, eliminar la humedad del agregado, recubrir el agregado con cemento asfáltico, y calentar el material recubierto a la temperatura adecuada para su descarga.

En un mezclador de tambor de flujo paralelo, la llama del quemador debe ser corta y densa, y no extenderse demasiado dentro del tambor para proteger el cemento asfáltico de temperaturas elevadas. Sin embargo, la llama debe tener suficiente espacio para expandirse y completar la combustión del combustible. El agregado que ingresa no debe depositarse directamente en el fuego, ya que esto apagaría la llama. Por ello, las primeras paletas en el extremo superior del tambor están diseñadas para dirigir el agregado más allá de la punta de la llama.

Las siguientes paletas levantan parte del agregado del fondo del tambor y comienzan a hacerlo girar a través de los gases de escape del quemador. A medida que el agregado avanza por el tambor, una mayor cantidad de material es levantada y volteada. Cerca del punto medio del tambor, se forma un velo de agregado que cubre toda el área transversal del tambor. Este velo es esencial para que se realice la transferencia de calor desde los gases de escape, permitiendo el secado y calentamiento del agregado. Cuanto más completo sea el velo, más eficiente será el proceso de transferencia de calor, menor será el consumo de combustible y más bajas serán las emisiones de partículas de la planta.

Algunos mezcladores de tambor están equipados con dispositivos ubicados cerca de la mitad del tambor diseñados para retardar el flujo del agregado hacia abajo. Un anillo insertado dentro del tambor reduce el diámetro en ese punto. Se produce una acumulación de agregado frente al anillo, creando un velo de material más denso. Algunos fabricantes de tambores instalan paletas "kicker" o de ángulo inverso en esta misma ubicación para interceptar el agregado y devolverlo hacia arriba, concentrando así el agregado en un solo lugar, aumentando la densidad del velo y mejorando la transferencia de calor. Aunque restringir el diámetro del tambor de alguna manera es beneficioso para aumentar la densidad del velo de agregado dentro del tambor, el área transversal reducida también hace que la velocidad de los gases de escape aumente, lo que podría incrementar la cantidad de finos expulsados del mezclador de tambor.

Más adelante en la longitud del tambor, el cemento asfáltico se inyecta dentro del tambor, y se utilizan paletas de mezcla para combinar el agregado con el cemento asfáltico. Estas paletas también permiten que las partículas recubiertas de cemento asfáltico continúen siendo calentadas por los gases de escape, completen el proceso de transferencia de calor y eleven la temperatura de la mezcla al nivel deseado para la descarga. En la parte trasera del tambor, se emplean paletas de descarga para depositar el material en la tolva de descarga para su transporte al silo de acumulación.

A medida que las paletas se desgastan por la acción abrasiva del agregado que se mueve a través del tambor, la eficiencia del proceso de calentamiento y secado puede reducirse. (La cantidad de desgaste en las paletas depende de las condiciones operativas de la planta y del tipo de agregado procesado). Por lo tanto, se debe verificar regularmente el estado de las paletas. Las paletas desgastadas o faltantes deben ser reemplazadas según sea necesario. Además, si no se está logrando una transferencia de calor adecuada, el tipo y la ubicación de las paletas dentro del tambor pueden modificarse para mejorar el velo de agregado que se desplaza a través de la sección transversal del tambor en su punto medio.

Las primeras plantas de mezcla en tambor se construyeron con una relación de longitud a diámetro de 4:1, que se utilizaba para los secadores de plantas de lotes; así, un secador de 2.45 m (8 pies) de diámetro tenía 9.75 m (32 pies) de longitud. La tendencia reciente es usar tambores más largos para obtener una transferencia de calor más completa desde los gases de escape hacia el agregado y reducir los problemas de emisiones, especialmente cuando se produce una mezcla reciclada. Algunos mezcladores de tambor actuales tienen relaciones de longitud a diámetro de 5:1 y 6:1. Así, un mezclador de tambor de 2.45 m (8 pies) de diámetro podría tener entre 12.19 y 14.63 m (40 a 48 pies) de longitud.

Aumentando el velo de agregado

Se pueden usar paletas kicker, diques, anillos de retención o donuts para retardar el flujo de material a lo largo del tambor y aumentar la densidad del velo de agregad

La reducción en la pendiente (de un máximo de 6.0% a un mínimo de 2.5%) aumenta el tiempo de permanencia o residencia del agregado en el tambor, lo que proporciona más tiempo para completar el proceso de transferencia de calor. El agregado adicional retenido en el tambor debido a lapendiente menor también genera un velo más densode material a lo largo de la sección transversal del tambor, mejorando aún más el grado de transferencia de calor.

Reducir la pendiente del tambor generalmente no causa un cambio en la tasa de producción de la planta. Una partícula individual de agregado tarda más en atravesar el tambor cuando se disminuye la pendiente, pero la tasa de producción real, en términos de toneladas por hora, permanece sin cambios. Sin embargo, los requisitos de potencia para los motores eléctricos que giran el tambor aumentan debido al peso adicional del agregado en el tambor. El resultado neto es un velo de agregado mejorado, una transferencia de calor más completa y una reducción en la temperatura de los gases de escape en todas las ubicaciones del tambor.

Varios fabricantes han desarrollado mezcladores de tambor que varían en diámetro a lo largo de su longitud: el tambor tiene un diámetro en uno o ambos extremos y un diámetro más pequeño en el centro. El cambio en el diámetro permite más espacio para la combustión del combustible del quemador y facilita la formación de un velo más denso de agregado en el tambor al comprimir el mismo volumen de material que estaba girando en un tambor de 2.60 m (8.2 pies) de diámetro, por ejemplo, en una sección de 2.13 m (7 pies) de diámetro, aumentando significativamente la densidad del velo de agregado. En este caso, el diámetro reducido funciona de manera similar a la instalación de un anillo dentro del tambor. El velo más denso mejora la eficiencia del proceso de transferencia de calor. Sin embargo, la velocidad de los gases de escape también aumenta debido al diámetro más pequeño, lo que puede incrementar la cantidad de partículas arrastradas al equipo de control de emisiones y posiblemente reducir los niveles de producción.

Transferencia de Calor

Mientras la temperatura de los gases de escape disminuye a medida que avanzan por el tambor, la temperatura del agregado aumenta mientras se desplaza en la misma dirección. El proceso de transferencia de calor se produce de tres maneras: radiante, conductiva y convectiva. El calor radiante proviene de la llama del quemador cuando los agregados pasan por debajo o por encima de ella. El calor conductivo se origina por el contacto con el agregado caliente y la carcasa caliente. El calor convectivo se transfiere a través de los gases deescape calientes, siendo este el método principal de transferencia de calor.

El agregado entra al tambor a temperatura ambiente y se calienta rápidamente por el calor radiante de la llama, iniciando el proceso de secado. A medida que avanza por el tambor, su temperatura aumenta hasta llegar a un punto donde se mantiene constante, ya que el calor de los gases de escape se usa para evaporar la humedad. Este tiempo constante depende de la humedad y la porosidad del agregado. Los materiales más porosos tardan más en secarse, y el agregado fino se calienta más rápido y alcanza temperaturas más altas debido a su mayor área superficial.

Una vez que se ha eliminado la mayor parte de la humedad, la temperatura del agregado comienza a subir nuevamente. Después de inyectar el cemento asfáltico, las paletas de mezcla, utilizadas en la mayoría de las plantas de mezcla en tambor, voltean la mezcla, exponiendo parcialmente el material a los gases de escape. La mezcla alcanza la temperatura de descarga requerida al acercarse al extremo del tambor. En resumen, la temperatura del agregado aumenta hasta que comienza el secado, se mantiene constante hasta que se seca completamente y luego vuelve a aumentar a medida que avanza hacia el extremo del tambor.

El contenido de humedad del agregado disminuye gradualmente en la parte frontal del tambor y más rápidamente cuando alcanza la temperatura necesaria para vaporizar el agua. Si el tiempo de permanencia en la parte central del tambor es suficiente, el contenido de humedad de la mezcla al descargarse puede reducirse a menos del 0,1 %. El contenido de humedad de la mezcla al descargarse casi siempre debe ser inferior al 0,5 % e idealmente inferior al 0,2 %.

INYECCIÓN DE CEMENTO ASFÁLTICO

En algunas plantas antiguas de mezcla en tambor de flujo paralelo, la línea de suministro de cemento asfáltico entra por el extremo del quemador, con un diámetro de tubería entre 50 y 100 mm. El cemento no se rocía, sino que se inyecta directamente desde la tubería. El punto de descarga suele estar entre la mitad y dos tercios del tambor. Una ventaja de

inyectar temprano el cemento es capturar rápidamente las partículas de polvo en el agregado. Sin embargo, tiene tres desventajas: (a) el cemento se endurece más por los gases calientes, (b) aumenta el humo azul por volatilización, y (c) el contenido de humedad en la mezcla puede ser mayor porque el cemento cubre el agregado antes de eliminar toda el agua. Por estas razones, no se recomienda inyectar cerca del quemador.

En la mayoría de las plantas de mezcla en tambor de flujo paralelo, el cemento asfáltico se inyecta a través de una tubería de 100 mm (4 pulgadas) de diámetro que entra por la parte trasera del tambor (ver Figura 9-7). En muchos casos, la entrada se sitúa aproximadamente entre el 40 % y el 30 % de la longitud del tambor desde el extremo de descarga de la mezcla (60 % a 70 % desde el quemador). En esta ubicación, la pequeña cantidad de humedad restante en el agregado hace que el volumen del aglutinante se expanda formando espuma y ayuda a recubrir el agregado. En una planta de mezcla en tambor, el término "recubrimiento" podría ser más adecuado que "mezcla" para describir la combinación del cemento con el agregado. Si el contenido de humedad sigue siendo alto en el punto de inyección, el recubrimiento puede retrasarse hasta que se elimine más humedad.

Si el cemento asfáltico contiene materiales volátiles que generan humo azul, puede ser necesario mover la tubería de suministro hacia el extremo de descarga para reducir la exposición al calor y disminuir las emisiones visibles. Sin embargo, si la cortina de agregado es adecuada, esto no sería necesario, y mover la línea podría afectar la

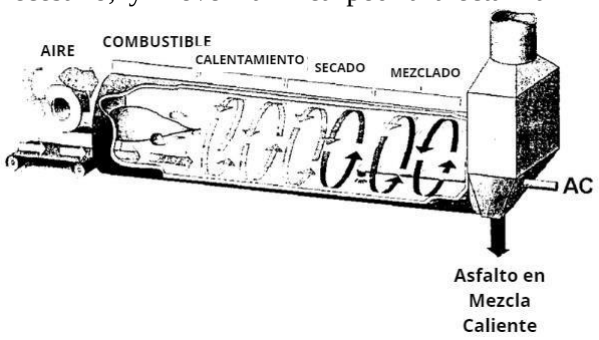


FIGURA 9 – 7 Zonas del mezclador en tambor de flujo paralelo.

uniformidad del recubrimiento. En algunas plantas, la línea de inyección se retira del tambor, y el agregado se calienta y seca antes de recubrirse en una unidad mezcladora externa, lo que evita la exposición al calor extremo y reduce las emisiones contaminantes.

En algunas plantas de mezcla en tambor, sin embargo, la línea de inyección de cemento asfáltico se retira completamente del tambor. El agregado se calienta y seca en el tambor pero sale sin recubrimiento. El agregado se descarga en una unidad recubridora de un solo eje o de doble eje (transportador sinfín), donde se inyecta el cemento asfáltico (ver Figura 5-6 en la Sección 5). La mezcla de los materiales ocurre a medida que el agregado y el cemento asfáltico se desplazan a lo largo del transportador sinfín. El material mezclado se deposita luego en un dispositivo de transferencia para su transporte al silo de acumulación. La unidad recubridora de mezcla en tambor es básicamente un medio para mantener el cemento asfáltico fuera del flujo de gases de escape a alta temperatura y así prevenir la generación de emisiones visibles.

Debido a los problemas para recubrir completamente los agregados gruesos y finos durante el muy corto tiempo que permanecen en la unidad recubridora del transportador sinfín (no hay suficiente tiempo de mezcla ni acción de mezcla), muchas plantas con estas unidades han sido modificadas por el contratista para colocar la tubería de inyección de cemento asfáltico nuevamente dentro del tambor a una corta distancia. Esta práctica resulta en un tiempo de mezcla más largo para el material aglutinante y el agregado, y por lo tanto, un recubrimiento de agregado más completo.

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE FILLER MINERAL Y FINOS DE LA BOLSA DE FILTRADO

Dos tipos de finos de agregado—relleno mineral comercial y finos de la bolsa de filtrado—pueden ser alimentados en una planta de mezcla en tambor, ya sea individualmente o en combinación. El equipo básico necesario para manejar cada tipo de material es esencialmente el mismo. La principal diferencia entre los diversos sistemas radica en el grado de sofisticación de los controles utilizados para medir losmateriales.

Relleno mineral

El relleno mineral, como cal hidratada, cemento Portland, cenizas volantes o polvo de piedra caliza, se almacena en un silo u otro recipiente apropiado y se entrega a la planta a través de un sistema de alimentador de palas o una pequeña tolva de pesaje ubicada en la parte inferior del silo. La velocidad del alimentador está relacionada con la cantidad de agregado nuevo y recuperado que se entrega al tambor. El silo normalmente está equipado con un sistema de aireación para evitar que el relleno mineral se compacte en una masa densa y bloquee la apertura hacia el alimentador. Si el flujo de relleno se ve restringido, el alimentador de palas seguirá rotando, pero no se enviará material a la planta.

El relleno mineral puede ser entregado al transportador de carga en el sistema de alimentación en frío y luego al tambor como parte del agregado, pero no es recomendable. Esto genera polvo cuando se deposita sobre el agregado y, debido a su finura, puede volverse fácilmente aerotransportado dentro del tambor y expulsado hacia la tolva de descarga o el equipo de control de emisiones. También puede mezclarse con el cemento asfáltico en el tanque de almacenamiento antes de ser alimentado a la planta, aunque esto rara vez se hacedebido a la separación y asentamiento del relleno más pesado respecto al cemento. El relleno mineral entra generalmente en la tubería de entrega y es transportado neumáticamente hasta la parte trasera del tambor. Se descarga de dos formas: sobre el agregado en el fondo del tambor o en un dispositivo de mezcla, donde se mezcla con el cemento antes de ser introducido en el tambor. Si el relleno se descarga antes del cemento asfáltico, puede ser expulsado al flujo de gases de escape, mientras que si se descarga después de la inyección del cemento, es más probable que el cemento lo capture y lo mezcle sin que se pierda material.

Finos de la bolsa de filtrado

Si se utiliza una bolsa de filtrado (filtro de tela) como equipo de control de emisiones en la planta, todo o parte del material capturado puede ser alimentado nuevamente al mezclador de tambor. Los finos capturados en la bolsa de filtrado son transportados, generalmente por un transportador sinfín, a través de una cerradura de aire y luego se alimentan neumáticamente a través de una tubería hacia el extremo trasero del tambor, como se muestra en la Figura 9-8.

Normalmente, los finos de la bolsa de filtrado no se miden, pero se devuelven de manera continua y se descargan en el tambor de una manera similar a la del relleno mineral. Ocasionalmente, un repunte de material fino puede ser transportado de regreso al mezclador de tambor. Si las características de operación de la planta causan que tales aumentos de finos de la bolsa de filtrado ocurran regularmente, los finos deben ser recolectados en un pequeño silo de repunte y luego medidos nuevamente en la planta utilizando un sistema de alimentador de palas.

Si los finos de la bolsa de filtrado no son necesarios para cumplir con los requisitos del diseño de la mezcla, pueden ser desechados en lugar de ser devueltos a la mezcla.

Los finos devueltos deben ser incorporados en la mezcla de asfalto y no se debe permitir que recirculen nuevamente al sistema.

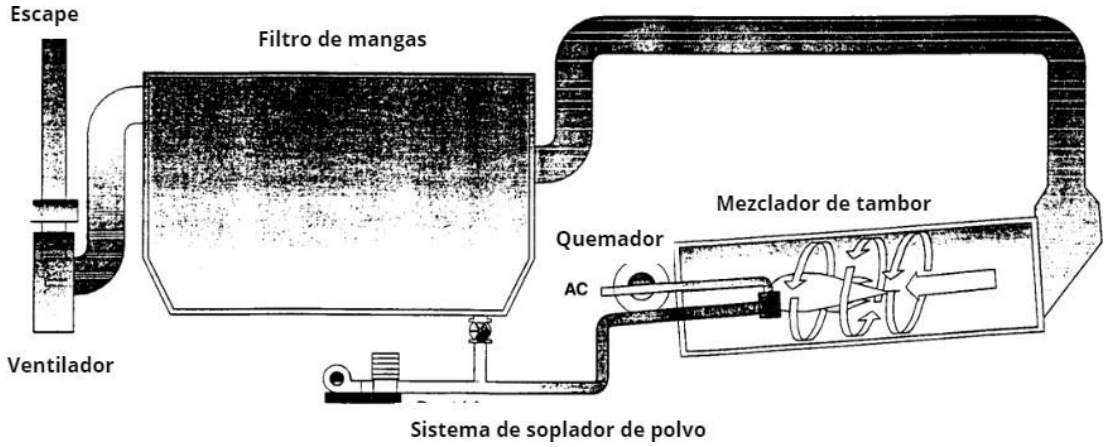


FIGURA 9 – 8 Transferencia neumática al área de mezcla del tambor.

Esto se logra asegurando que las partículas finas no entren en contacto directo con los gases de escape de alta velocidad y que sean rápidamente recubiertas con cemento asfáltico. Si las partículas finas son transportadas de regreso al colector de polvo, serán capturadas y nuevamente retornadas al mezclador de tambor. Pronto, el colector estará sobresaturado con partículas finas, ya que constantemente se generan nuevas partículas dentro de la planta. Esto provoca que el colector se obstruya y no funcione correctamente. Por lo tanto, es esencial que, al igual que con el relleno mineral, las partículas finas del colector sean recubiertas con cemento asfáltico antes de ser arrastradas por los gases de escape y expulsadas del mezclador.

La cantidad granulometría de las partículas finas provenientes del colector que se reincorporan a la mezcla asfáltica dentro del tambor pueden tener un efecto importante en las propiedades de la mezcla.

PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO

Sistemas de Alimentación Única

Debido a los problemas inherentes de control de emisiones asociados con el uso de sistemas de alimentación única, los sistemas de alimentación dividida, en los cuales el RAP se introduce en el mezclador de tambor por separado del agregado nuevo, son los más comúnmente utilizados para producir mezclas asfálticas recicladas. En las pocas plantas restantes que emplean un sistema de alimentación única para suministrar tanto el agregado nuevo como el RAP al extremo del quemador del mezclador de tambor, se utilizan varios métodos, ya sea de forma individual o combinada, para proteger el material recubierto con asfalto del contacto directo con la llama y para reducir la generación de emisiones visibles de hidrocarburos.

Un método consiste en rociar agua sobre el agregado combinado en la cinta de carga antes de que ingrese al tambor. El nivel de protección proporcionado por el agua adicional en la superficie del agregado depende de varios factores: la cantidad de humedad presente en y sobre el material recuperado, la cantidad de agua aplicada (típicamente entre el 1 % y el 4 % del peso del RAP) y la posición del material recuperado en la cinta de carga, ya sea debajo o encima del agregado nuevo.

Otro método consiste en el uso de un escudo térmico para reducir el contacto del agregado combinado con la llama. Este dispositivo distribuye la llama a lo largo de la circunferencia del tambor, disminuyendo la concentración de calor en un punto específico cerca de la llama.

El rendimiento del escudo térmico depende de su ubicación dentro del tambor, la cantidad de RAP en la mezcla, el contenido de humedad del agregado nuevo y recuperado, y la temperatura requerida para la descarga de la mezcla. La eficiencia del escudo térmico puede evaluarse por la cantidad de humo azul que se genera durante la operación de reciclaje.

Sistemas de Alimentación Dividida

En un sistema de alimentación dividida, el agregado nuevo se entrega al extremo del quemador de la planta de mezcla en tambor de manera convencional. El RAP se introduce en un punto de entrada separado, cerca de la mitad de la longitud del tambor, como se muestra anteriormente en la Figura 5-6.

Se emplean diversos diseños en el sistema de entrada utilizado para introducir el RAP en el tambor. Generalmente, el tambor cuenta con una serie de puertos o canales de entrada recortados en la carcasa que permiten la incorporación del RAP desde la cinta de carga mientras el tambor gira. En el punto donde el RAP ingresa a la carcasa, a menudo se retira o se adapta una corta sección de las aletas del tambor para facilitar la incorporación del material recubierto con asfalto al agregado nuevo. El RAP comienza a calentarse tan pronto como entra por el puerto. El agregado combinado es recogido por las aletas, y el proceso de calentamiento y secado tanto del material nuevo como del RAP continúa.

Cuando el RAP se introduce en el tambor en su punto medio, se coloca menos agregado nuevo en el extremo del quemador del tambor, lo que reduce la densidad del velo de agregado corriente arriba del punto de entrada del RAP y disminuye la cantidad de calor transferido desde los gases de escape al agregado nuevo. Como resultado, la temperatura de los gases en el punto donde entran en contacto con el RAP es más alta, aumentando la probabilidad de quemar el recubrimiento asfáltico del RAP.

Normalmente, si se incorpora un 20 % o menos de RAP en una mezcla reciclada y se utiliza un sistema de alimentación dividida, las emisiones de hidrocarburos son mínimas, siempre que el velo de agregado nuevo dentro del tambor sea adecuado y la temperatura de descarga de la mezcla sea la correcta. A medida que aumenta el porcentaje de RAP y el contenido de humedad se incrementa, existe un mayor potencial de problemas de emisiones. Cuando la cantidad de RAP supera el 50 % del peso de la mezcla, la emisión de humo azul durante el proceso de reciclaje puede volverse significativa. Para evitar estos problemas, es necesario implementar una combinación de procedimientos, como los descritos anteriormente, para garantizar una transferencia de calor adecuada de gases de escape al agregado nuevo antes de que dichos gases entren en contacto con el RAP.

Solo bajo condiciones de producción ideales y cuidadosamente controladas puede ser posible incorporar más del 50 % de RAP en una mezcla reciclada sin enfrentar problemas importantes de

emisiones visibles. Debido a la reducción en las tasas de producción y los problemas de control de emisiones que surgen cuando se utilizan altos porcentajes de RAP en una mezcla asfáltica reciclada, normalmente se considera una buena práctica limitar la cantidad de material recuperado procesado a través de una planta de mezcla en tambor con alimentación dividida a aproximadamente el 50 % del peso total del agregado. En la mayoría de los casos, la cantidad de RAP realmente utilizada es mucho menor al 50 % del peso total de la mezcla.

TASAS DE PRODUCCIÓN

Las plantas de mezcla en tambor HMA se clasifican según la cantidad de toneladas de mezcla que pueden producir por hora. La capacidad de producción generalmente está relacionada con la temperatura del agregado entrante, la temperatura de descarga de la mezcla, el calor específico del agregado y una remoción promedio del contenido de humedad del agregado del 5 % para una planta operada a nivel del mar. Las capacidades de las plantas también se ven afectadas por una serie de otras variables, que incluyen el diámetro del tambor, el tipo de combustible, la velocidad de los gases de escape, la capacidad del ventilador de escape, la cantidad de aire en exceso en el quemador, la estimación de la fuga de aire en el sistema y las condiciones atmosféricas. La gradación del agregado puede ser un factor relevante en mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso, ya que este tipo de mezclas es más difícil de calentar de manera uniforme en comparación con las mezclas que incorporan un equilibrio de partículas de agregado grueso y fino. Esto significa que una planta de mezcla debe estar configurada cuidadosamente teniendo en cuenta las condiciones operativas y el tipo de mezcla que se va a producir, para optimizar la eficiencia y mantener la calidad de la mezcla final.

Una de las variables que tiene el mayor efecto sobre la tasa de producción de la planta es el contenido promedio de humedad de los agregados gruesos y finos. El contenido de humedad del agregado fino suele ser más alto que el del agregado grueso. Por lo tanto, el contenido promedio de humedad es una función de la cantidad de humedad en el agregado grueso y su porcentaje en la mezcla, más la cantidad de humedad en el agregado fino y su porcentaje en la mezcla. Si, por ejemplo, el 60 por ciento de la mezcla está compuesto por agregado grueso con un 3.0 por ciento de humedad y el 40 por ciento de la mezcla es agregado fino (con un 8.0 por ciento de humedad), el contenido de humedad del agregado combinado es del 5.0 por ciento. Si la humedad del agregado fino se reduce al 6.0 por ciento, la humedad en la alimentación fría que entra al tambor se reduce al 4.2 por ciento. A medida que el porcentaje promedio de humedad en el agregado aumenta, la capacidad de producción de un mezclador de tambor de un diámetro dado disminuye. Con un contenido promedio de humedad entrante constante, la tasa de producción aumenta a medida que el diámetro del tambor se hace más grande. La relación teórica entre el contenido promedio de humedad, el diámetro y la longitud del tambor, y la tasa de producción calculada de la planta de mezcla en tambor [a una temperatura de descarga de mezcla de 132°C (270°F)] se muestra en la Tabla 9-1 para diferentes modelos de una marca en particular de planta, con un flujo dado de gases de escape y un conjunto de condiciones operativas para cada tamaño de planta. Gráficos similares están disponibles de los fabricantes de otras marcas de mezcladores de tambor.

La Tabla 9-1 indica que, con un contenido promedio de humedad del 5 por ciento, una planta de mezcla en tambor con un diámetro de 1.8 m (6 pies) tiene una capacidad de producción teórica de 143 toneladas (158 toneladas) de mezcla por hora. Si se utiliza un tambor de 2.44 m (8 pies) de diámetro, la tasa de fabricación aumenta a 276 toneladas (305 toneladas) de mezcla por hora. Para un mezclador de tambor de 3.0 m (10 pies) de diámetro, la capacidad aumenta a 492 toneladas (541 toneladas) de mezcla por hora con una eliminación de humedad del 5 por ciento. A medida que el contenido de humedad en el agregado disminuye del 5 al 3 por ciento, la tasa de producción para un mezclador de tambor de 2.4 m (8 pies) de diámetro aumenta de 276 toneladas (305 toneladas) por hora a 391 toneladas (430 toneladas) de mezcla por hora. Si los agregados tienen un contenido de humedad más alto (por ejemplo, 8 por ciento), un mezclador de tambor del mismo diámetro de 2.4 m (8 pies) solo puede producir 191 toneladas (210 toneladas) de mezcla asfáltica por hora. Así, el contenido promedio de humedad del agregado afecta directamente la capacidad de una planta de mezcla en tambor.

La temperatura de descarga de la mezcla, mantenida constante en 132°C (270°F) en el ejemplo anterior, también afecta la tasa de producción de la planta: a medida que la temperatura de descarga de la mezcla disminuye para un contenido de humedad del agregado y un tamaño de tambor dados, el volumen de mezcla que se puede fabricar en un período de tiempo determinado aumenta. La Figura 9-9 muestra que para una planta de mezcla en tambor de un fabricante, con un diámetro de 2.2 m (7.3 pies) y una longitud de 8.5 m (28 pies), con una eliminación de humedad del 5 por ciento, la tasa de producción aumenta de 232 toneladas (255 toneladas) por hora a una temperatura de descarga de mezcla de 149°C (300°F) a 273 toneladas (300 toneladas) por hora a una temperatura de 121°C (250°F). Cuando el contenido de humedad del agregado entrante es relativamente alto, los cambios en la tasa de producción no son tan grandes

cuando la temperatura de descarga de la mezcla se reduce. Con un contenido promedio de humedad del 8 por ciento, la capacidad de producción de la misma planta aumenta de 159 a 182 toneladas (175 a 200 toneladas) por hora a medida que la temperatura de descarga de la mezcla disminuye de 149°C (300°F) a 121°C (250°F).

TABLA 9-1 Capacidades nominales de plantas de mezcla en tambor.

Diam. y longitud del tambor (ft)	Capacidad (Tons por hora) para eliminar la humedad superficial (%)								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5×22	178	140	116	100	84	79	74	63	58
6×24	278	220	178	158	137	121	116	100	89
7×30	420	336	273	236	205	184	163	147	137
8×32	541	430	352	305	263	236	210	194	173
9×36	719	578	478	410	357	315	284	257	236
10×40	956	761	630	541	473	430	378	341	315

Nota: Las cifras para cada tamaño de secador corresponden a capacidades de mezcla de concreto asfáltico. Los ejemplos sobre los efectos del contenido de humedad superficial en las tasas de producción de la planta son específicos para las plantas de mezcla en tambor de un fabricante. 1 ft = 0,305 m; 1 tonelada = 0,907 toneladas métricas.
Fuente: Barber – Greene

La tasa de producción de una planta de mezcla en tambor también se ve afectada por el volumen y la velocidad de los gases de escape que son aspirados a través del sistema por el ventilador de escape. A medida que disminuyen el volumen y la velocidad de los gases, la capacidad de producción del mezclador de tambor se reduce.

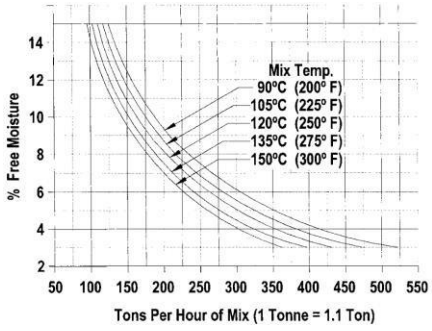


FIGURA 9 - 9 Efecto del contenido de humedad y la temperatura de descarga de la mezcla sobre la tasa de producción de la planta de mezcla en tambor.

Para aquellas plantas que operan con un sistema de alimentación dividida, la tasa de producción de mezclas recicladas también depende del volumen de RAP que se alimenta al mezclador de tambor. A medida que la cantidad de RAP entregada al tambor supera el 50 por ciento de la alimentación total de agregados, la capacidad de la planta disminuye, como se muestra en la Figura 9-10 para una marca específica de planta de mezcla en tambor. Esta disminución es causada por la falta de una cantidad adecuada de nuevo agregado en el extremo superior del mezclador de tambor para permitir una transferencia de calor adecuada desde los gases de escape del quemador hacia el nuevo agregado. Esto, a su vez, reduce el calor transferido del nuevo agregado al RAP. La Figura 9-10 muestra que una mezcla reciclada compuesta por 60 por ciento de RAP y 40 por ciento de agregado nuevo, con un contenido de humedad ponderado en los materiales combinados del 5 por ciento, tiene un número de índice de aproximadamente 0.70. El número de índice significa que esta planta solo puede producir el 70 por ciento de la mezcla por hora, con una mezcla 60/40 de RAP y agregado nuevo, en comparación con lo que podría producir si la misma planta utilizara solo agregado nuevo. Así, si la planta pudiera fabricar 280 toneladas (308 toneladas) por hora con 100 por ciento de material nuevo y una eliminación de humedad del 5 por ciento, teóricamente tendría una capacidad de solo 280 × 0.70 = 196 toneladas (308 × 0.70 = 216 toneladas) por hora si se incorporara un 60 por ciento de RAP en la mezcla. A medida que aumenta la cantidad de RAP utilizada en la mezcla reciclada por encima del 50 por ciento, la cantidad de mezcla que se puede producir en una planta de mezcla en tambor se reduce proporcionalmente.

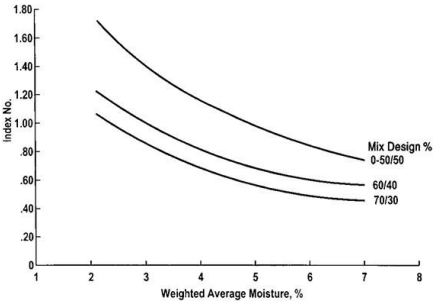


FIGURA 9 - 10 Efecto de la cantidad de RAP en la producción de la planta de mezcla en tambor.

El número de índice proporciona una forma de estimar el efecto de la incorporación de RAP en el mezclador de tambor sobre la tasa de producción de la planta. La tasa de producción real de una planta de mezcla en tambor dependerá de una variedad de factores, incluidos el volumen de los gases que se extraen del sistema y la temperatura de esos gases.

EFICIENCIA DE LA PLANTA

Una planta debe funcionar al ritmo de producción más eficiente, independientemente de la demanda; debe pararse cuando los silos estén llenos y volver a ponerse en marcha cuando vuelva a necesitarse mezcla. Existen dos métodos para juzgar la eficiencia de funcionamiento de una planta de mezcla de tambor de flujo paralelo: (a) determinar la diferencia entre la temperatura de la mezcla en el momento de la descarga y la de los gases de escape en el mismo punto, y (b) observar la mezcla de asfalto a medida que se descarga.

Temperaturas de la mezcla y de la chimenea

Si en el interior del tambor se produjera una transferencia de calor perfecta, la temperatura de la mezcla en el momento de la descarga de la mezcladora sería igual a la temperatura de los gases de escape en el mismo punto (véase también el análisis anterior del proceso de transferencia de calor). Este punto de equilibrio significaría que la transferencia de calor está equilibrada y que el tambor mezclador funciona con la máxima eficacia de transferencia de calor posible. En condiciones normales de funcionamiento, si el velo de agregados en el interior del tambor es completo, la temperatura de los gases de escape medida a la salida del tambor o antes de que los gases entren en el sistema de control de emisiones debería estar dentro de los 10°C de la temperatura de la mezcla (suponiendo que no se produzcan fugas y que no se añada aire de refrigeración en los conductos entre el final del tambor y el punto en que se miden las temperaturas de los gases en los conductos). Por lo tanto, si la temperatura de descarga de la mezcla es de 140 °C, la temperatura medida de los gases de escape debería ser inferior a 150 °C. Esta pequeña diferencia de temperatura implica que la temperatura de los gases de escape debe ser inferior a 150 °C. Este pequeño diferencial de temperatura implica que el tambor mezclador está funcionando eficazmente y que se está quemando el mínimo combustible por tonelada.

Una temperatura de los gases de escape superior a unos 10°C por encima de la temperatura de la mezcla indica que el proceso de transferencia de calor dentro del tambor no es todo lo eficiente que podría ser, principalmente debido a la falta de un velo de áridos uniformemente denso en toda la sección transversal del tambor. A veces se encuentran diferencias de temperatura de hasta 55°C entre la mezcla y los gases de escape, lo que indica que la planta no se está manteniendo o explotando correctamente y que el control de emisiones podría ser un problema. El grado de ineficacia operativa está relacionado con la diferencia entre las dos temperaturas antes de la entrada en el sistema de control de emisiones.

Durante la producción de RAP en una mezcladora de tambor de alimentación única, la transferencia de calor entre los gases de escape y los agregados nuevos y recuperados debe ser similar a la de una mezcla que utiliza todo el material nuevo. Así pues, para este proceso, la temperatura de los gases de escape debería estar dentro del diferencial de temperatura de 10 °C si la planta funciona correctamente. Si se emplea un sistema de alimentación dividida, la diferencia entre las dos temperaturas puede ser superior a 10°C, dependiendo de la proporción de RAP introducida en el punto de entrada central. El reciclado en frío es un proceso que requiere de un tiempo de secado prolongado. Cuando el 50 % de la mezcla reciclada consiste en RAP, la temperatura de los gases de escape puede estar más de 40°C por encima de la temperatura de descarga de la mezcla.

La eficacia de la operación de calentamiento y secado puede juzgarse en parte observando el diferencial de temperatura entre la mezcla que sale del tambor y los gases de escape medidos en los conductos. Debido a que ambas temperaturas suelen registrarse continuamente y visualizarse en la consola de control de la planta, este método de supervisión del proceso de producción de la planta es fácil de aplicar

Las altas temperaturas de los gases de escape también pueden provocar una corrosión importante y prematura en uno de los lados de los conductos situados entre el extremo de descarga del tambor mezclador y el colector primario. Esta corrosión es otra de las razones por las que es necesario vigilar la eficacia del funcionamiento de la planta y controlar la temperatura de los gases de escape en el momento en que salen del tambor.

Supervisión de la descarga de la mezcla

Una segunda forma de juzgar la eficacia del funcionamiento de la planta de mezcla en tambor es observar la mezcla asfáltica a medida que se descarga del tambor. El aspecto de la mezcla, tanto si se compone exclusivamente de áridos nuevos como de una mezcla de áridos nuevos y recuperados, debe ser uniforme en toda la anchura del canal de descarga. El color de las partículas de árido debe ser uniforme, y las partículas de árido más finas deben estar distribuidas uniformemente por toda la mezcla.

Si el combustible utilizado por el quemador no se quema completamente, las partículas de árido más gruesas de la mezcla pueden aparecer cubiertas de una mancha marrón oscura en lugar de tener el espesor de película adecuado de cemento asfáltico. Además, la adherencia del ligante de cemento asfáltico al árido puede reducirse, y la mezcla tendrá una mayor tendencia a desprenderse cuando se compruebe si hay posibles daños por humedad.

Si el velo de agregados en el interior del tambor no está completo, los gases de escape se desplazarán por un lado del tambor, dependiendo del sentido de giro de éste, a mayor velocidad que por el otro lado del tambor. Las partículas finas de polvo serán recogidas por la corriente de gases de escape y transportadas a la parte trasera del tambor. A medida que los gases de escape cambien de dirección para entrar en los conductos, las partículas de polvo más grandes se desprenderán de la corriente de gas. Estas partículas sin recubrimiento se descargarán por un lado de la mezcla al salir del tambor. Un flujo constante de partículas finas de árido sin recubrimiento de color marrón claro en un lado del conducto de descarga de HMA indica, por tanto, que el velo de árido dentro del tambor está incompleto.

Si se está añadiendo un aditivo seco en polvo, como cal hidratada, al árido frío entrante en el extremo del quemador de la mezcladora, es posible que se recoja material muy fino en los gases de escape poco después de que se cargue en la planta. Cuando el velo del árido es el adecuado, el material fino queda atrapado en la masa de árido que gira y se incorpora a la mezcla. Sin embargo, si el velo del árido es incompleto, el material en polvo puede ser arrastrado por un lado del tambor y caer en el fondo del tambor en el punto de descarga de la mezcla, dependiendo del tamaño de las partículas en relación con la velocidad de los gases de escape. La cal en polvo será entonces visible en uno de los lados de la mezcla asfáltica cuando se descargue del tambor. Por lo tanto, este método de adición de relleno mineral no debe utilizarse a menos que el relleno esté bien mezclado con el árido entrante antes de que los dos materiales se carguen en el tambor mezclador.

Normalmente, una temperatura elevada de la pila en relación con la temperatura de descarga de la mezcla irá acompañada de una corriente de finos de color claro en un lado del conducto de descarga de la mezcla. Ambos fenómenos son indicios de que el tambor mezclador no funciona bien. El operador de la planta debe modificar el proceso de producción para conseguir un velo de árido más denso en el tambor.

RESUMEN

Los siguientes factores clave deben tenerse en cuenta al supervisar el funcionamiento de una planta de mezcla de tambor de flujo paralelo:

- Debe monitorizarse el sonido del quemador. Es deseable un rugido uniforme y constante. Un sonido de tos, chisporroteo o chorreo puede significar que el quemador no es capaz de quemar adecuada y completamente el combustible que está intentando quemar. Las manchas marrones o la reducción del espesor de la lámina de cemento asfáltico en las partículas más gruesas del árido en el extremo de descarga del tambor mezclador también indican.
- La densidad del velo de áridos dentro del tambor cerca del punto medio de su longitud es la clave para un funcionamiento eficaz de la mezcladora de tambor y un uso económico del combustible. La integridad del velo puede determinarse comparando la temperatura de descarga de la mezcla con la de los gases de escape en la chimenea. La temperatura de la chimenea no debería ser superior en más de 10°C a la temperatura de descarga de la mezcla. Unas diferencias de temperatura mayores indican que la planta no funciona de forma eficiente.
- La presencia de áridos finos de color marrón claro sin recubrir en un lado de la mezcla en el conducto de descarga también es un indicio de que el velo de áridos no está completo en toda la circunferencia del tambor.
- La densidad del velo de áridos en el interior del tambor puede aumentarse mediante el uso de trampillas, presas, donuts o anillos de retención cerca del punto medio de la longitud del tambor. La densidad también puede aumentarse reduciendo la pendiente del tambor para aumentar el tiempo de permanencia del árido en el tambor.
- Si se añade RAP al tambor a través de un sistema de alimentación dividida, la diferencia entre la temperatura de descarga de la mezcla y la temperatura de los gases de escape medida en la chimenea será normalmente superior a 10°C (18°F) y aumentará aproximadamente en proporción a la cantidad de RAP añadida a la mezcla.
- La tasa de producción de la planta se determina a una temperatura de descarga de la mezcla dada y un contenido medio de humedad en el árido, normalmente del 5%, a una determinada elevación. Un aumento en el contenido de humedad o un aumento en la temperatura de descarga de la mezcla disminuirá la capacidad del tambor mezclador en términos de toneladas de mezcla producida por hora.
- Las tasas de producción de HMA reciclado, hasta un contenido de RAP del 50 %, serán normalmente similares a las tasas de producción de mezclas que contienen todos los áridos nuevos. Por encima de esa cantidad de material reciclado por tonelada de mezcla, la tasa de producción de la mezcladora de tambor de flujo disminuirá a medida que aumente la cantidad de material reciclado.

10 Plantas de mezcla de tambor a contracorriente

En este apartado se aborda el tratamiento de los áridos y del cemento asfáltico en una planta de mezcla de tambor de flujo contrario. Este tipo de planta, desarrollada a principios de 1930, ha sustituido a la planta de tambor-mezclador de flujo paralelo como principal tipo de planta adquirida por los contratistas para fabricar HMA. La planta de mezclado de tambor de flujo contrario es esencialmente un secador de áridos de flujo contrario similar al utilizado para calentar y secar áridos para una operación de planta discontinua, con una unidad de mezcla unida de una de las dos formas principales al extremo del secador. Primero, se revisan los métodos utilizados para introducir el árido en el tambor, el funcionamiento del quemador y el calentamiento y secado del árido a medida que se desplaza por el tambor en dirección contraria a los gases de escape del quemador. A continuación, se describe el funcionamiento de la unidad de mezcla. También se revisa la combinación de los componentes de la mezcla. La sección finaliza con un resumen de los factores clave que deben tenerse en cuenta a la hora de supervisar el funcionamiento de una planta de mezclado de tambor de contracorriente. Normalmente se venden dos tipos diferentes de plantas de mezcla de tambor de flujo inverso. La primera planta, mostrada anteriormente en la Figura 5-7, tiene la unidad de mezclado extendida en el extremo de la porción del secador de áridos del tambor. El segundo, una planta de doble barril mostrada en la Figura 5-8, tiene la unidad de mezclado doblada hacia atrás alrededor de la parte del secador de áridos del tambor. Ambos estilos de planta llevan a cabo los mismos procesos, según sea necesario; adición del material ligante; y mezcla de todos los componentes para obtener un producto de alta calidad.

ENTRADA DE AGREGADOS, CALEFACCIÓN Y SECADO

El árido entra en la planta de mezclado de tambor a contracorriente desde el extremo superior del tambor, de forma similar a la entrada utilizada para un secador de planta discontinua, tal como se comenta en el apartado 8. Normalmente, el árido es introducido en una rampa inclinada por el transportador de carga y se desliza hacia el interior del tambor. Puede utilizar un sistema transportador para introducir el árido en el tambor. En algunas plantas, se emplea un vertedero giratorio para garantizar que el árido no se cuelgue durante su introducción en el tambor.

En la planta convencional de mezcla en tambor con la unidad de mezcla extendida detrás de la parte del tambor correspondiente al secador de áridos (Figura 5-7), el cabezal del quemador está incrustado en el tambor giratorio. Aunque el propio quemador se encuentra fuera del tambor, el combustible no se enciende ni arde hasta que llega a la cabeza del quemador. Todo el aire necesario para la combustión. El aire extra es aspirado hacia el interior del tambor por el extractor a por un tubo que rodea el conjunto del quemador y lo protege de los daños causados por el agregado. La figura 5-7 muestra el cabezal del quemador mientras el árido se desplaza corriente abajo hacia el quemador, con los gases de escape moviéndose en contraflujo. En el tipo de tambor mezclador de doble barril a contraflujo, la ubicación del quemador es similar a la de un secador de áridos a contraflujo normal. El quemador es de aire total, como se explica en la sección 9 y se muestra en la figura 9-4. La posición del quemador en este tipo de instalación se muestra en la figura 5-5. La posición del quemador en este tipo de instalación se muestra en la Figura 5-8. El calentamiento y el secado de los áridos se efectúan a medida que los áridos gruesos y finos combinados se desplazan a través del secador por la acción de las aletas giratorias y la gravedad. Los gases de escape del quemador se mueven corriente arriba, en dirección opuesta al flujo. A medida que el árido se desplaza hacia el quemador y sigue calentándose, la humedad se elimina de la superficie de las partículas de árido. Si se va a añadir RAP al nuevo árido, la temperatura del nuevo árido se incrementa hasta el nivel que permita una adecuada transferencia de calor entre el nuevo árido sobrecalentado y el material recuperado a temperatura ambiente. Esta práctica es similar al calentamiento adicional del nuevo árido cuando se va a utilizar RAP en un proceso de mezclado en planta discontinua (ver Sección 8).

A diferencia de una planta de mezcla de tambor de flujo paralelo, no se agrega material aglutinante de cemento asfáltico dentro de la parte de secado de la mezcladora de tambor de contraflujo. La sección inicial del tambor es solo una secadora. No se agrega ningún material (relleno mineral, finos de mangas o RAP) aguas arriba del quemador.

UNIDAD DE MEZCLA

Tambor de contracorriente convencional

Para la unidad de contraflujo en la que el quemador está incrustado en el tambor y la mezcla se produce como una extensión del funcionamiento del tambor de secado, el agregado calentado y seco pasa sobre una presa o anillo de retención ubicado justo detrás (aguas abajo) del cabezal del quemador. Por lo general, se usa una serie de aberturas o puertos para permitir que el agregado pase a la unidad de mezcla.

Una vez que el agregado calentado ha ingresado a la cámara de mezcla del tambor, el RAP, si se usa, se agrega al nuevo agregado. Debido a que el RAP se introduce en el tambor detrás del quemador, no está expuesto a la llama del quemador. Por esta razón, las emisiones de hidrocarburos no son un problema, como pueden serlo con un mezclador de tambor de flujo paralelo. La transferencia de calor del nuevo agregado comienza tan pronto como los dos materiales se unen en el extremo superior de la unidad de mezcla. La humedad contenida en el RAP es extraída de la unidad de mezcla y alrededor del quemador por el ventilador de escape. Las emisiones de hidrocarburos liberadas por el RAP también son extraídas de la unidad de mezcla por el extractor de aire, pero estos humos se incineran a medida que pasan por el área del quemador. Por lo tanto, con un mezclador de tambor de contraflujo, se minimiza la generación de humo azul.

Poco después de que el RAP se haya introducido en la parte de mezcla del tambor, también se introducen cualquier otro aditivo necesario en el HMA, incluido el polvo de la cámara de filtros y el relleno mineral. Debido a que el flujo de aire en la unidad de mezcla es mínimo, no hay posibilidad de que ningún aditivo en polvo relativamente pesado, como los finos devueltos o el relleno, se transporte por el aire y sea arrastrado a la parte de secado del tambor por el ventilador de escape. La mezcla del RAP, los finos de relleno y de la cámara de filtros, y el nuevo agregado comienza tan pronto como los materiales se introducen en la cámara de mezcla.

Muy pronto después de que todos los materiales agregados se hayan mezclado inicialmente, se agrega el aglutinante para producir el HMA. El recubrimiento del agregado tiene lugar a medida que los materiales combinados se mezclan y se mueven hacia el extremo de descarga de la unidad el agregado sobrecalentado y el material recuperado. El nuevo material aglutinante entra en la capa exterior un poco más abajo (pero cuesta arriba).

Dependiendo del ángulo del tambor, así como del número y tipo de vuelos en la cámara de mezcla, el tiempo de mezcla en este tipo de tambor de contraflujo suele ser en el rango de 45 a 60 segundos. Una vez finalizado el proceso de mezcla, el material HMA se entrega en un conducto de descarga y se transporta a un silo.

Tambor de contraflujo de doble cañón

Con un sistema de doble barril, la cámara de mezcla se pliega alrededor del tambor de secado de agregados. Esta unidad de mezcla es inusual porque no gira. Como se ve en la Figura 5-8, el agregado calentado y seco se descarga desde debajo del quemador hacia abajo en la capa exterior o tambor no giratorio. Esto ocurre en el extremo inferior de la unidad de mezcla.

Poco después de que el nuevo agregado ingresa a la cámara de mezcla, el RAP, si se usa, se agrega al tambor externo. Este material cae en la cáscara y se mezcla rápidamente con el nuevo agregado sobrecalentado. La transferencia de calor del nuevo agregado caliente al RAP a temperatura ambiente comienza inmediatamente. Al igual que con el mezclador de tambor de contraflujo convencional, cualquier humedad en el RAP y cualquier emisión de hidrocarburos que se desarrolle durante el proceso de calentamiento son devueltas a la unidad de secado por el ventilador de escape. La humedad se transporta al equipo de control de emisiones, de manera similar a lo que sucede con la humedad liberada por el nuevo agregado durante el proceso de calentamiento y secado. Las emisiones de hidrocarburos del RAP, si las hay, son incineradas por el quemador.

Una vez que el RAP ha entrado en la capa exterior, los aditivos, como el relleno mineral, necesarios en la mezcla se depositan en la zona de mezcla. Los finos de la cámara de filtros también se introducen en la carcasa exterior en el mismo lugar. Debido a que el flujo de aire en el área entre el tambor interno y la capa exterior es mínimo, no hay tendencia a que los materiales agregados salgan de la cámara de mezcla y se introduzcan en la sección de secado de agregados de la planta de mezcla de tambor.

Cuando todos los materiales agregados están en la capa exterior, el cemento asfáltico se agrega a la mezcla. En la mayoría de las plantas de doble barril, los materiales aglutinantes se pueden agregar en una de dos ubicaciones diferentes. Si no se agrega RAP a la mezcla, el cemento asfáltico se introduce con mayor frecuencia lo más rápido posible, poco después de que el nuevo agregado, los finos de la cámara de filtros y el relleno mineral, si los hay, se hayan cargado en el tambor exterior. Si se utiliza RAP en la mezcla, la adición del material aglutinante se retrasa, por lo que puede tener lugar cierta transferencia de calor entre el nuevo

La mezcla se lleva a cabo mediante una serie de paletas unidas al exterior del tambor interior, el secador de agregados (ver Figura 5-8). Las paletas se colocan en el ángulo adecuado para empujar la combinación de

agregados nuevos, finos de la cámara de filtros y relleno mineral, RAP y cemento asfáltico cuesta arriba, mezclandoestos materiales a medida que viajan en el espacio estrechoentre el exterior del tambor interno giratorio y el interior del tambor exterior no giratorio. La mezcla se produce sóloen un cuarto inferior de la circunferencia de la capa exterior; La mezcla no se transporta por la parte superior del tambor interior. Además de la transferencia de calor que tiene lugar por contacto directo entre el nuevo agregado y los otros componentes de la mezcla, se produce un calentamiento adicional cuando todos los materiales entran en contacto con el tambor interior y por radiación decalor desde el tambor interior a la carcasa exterior (Figura 5-8). Las paletas se colocan en el ángulo adecuado para empujar la combinación de agregados nuevos, finos de la cámara de filtros y relleno mineral, RAP y cemento asfáltico cuesta arriba, mezclando estos materiales a medida que viajan en el espacio estrecho entre el exterior del tambor interno giratorio y el interior del tambor exteriorno giratorio. La mezcla se produce sólo en un cuartoinferior de la circunferencia de la capa exterior; La mezclano se transporta por la parte superior del tambor interior. Además de la transferencia de calor que tiene lugar por contacto directo entre el nuevo agregado y los otros componentes de la mezcla, se produce un calentamiento adicional cuando todos los materiales entran en contacto con el tambor interior y por radiación de calor desde el tambor interior a la carcasa exterior.

Para lograr una mezcla eficiente, se debe mantener la distancia adecuada entre los extremos de las paletas y el interior de la carcasa exterior. Las puntas de las paletas y la placa de revestimiento de la carcasa exterior debenrevisarse periódicamente para verificar el desgaste para asegurarse de que no se acumule material en la carcasa exterior y que se produzca una mezcla adecuada. Dependiendo del tamaño y la capacidad de producción de la planta de doble barril, la mezcla de todos los componentes de la mezcla generalmente ocurre en menos de 60 segundos. Una vez finalizado el proceso de mezcla, el material HMA se entrega en un conducto de descarga para su transporte a un silo.

RESUMEN

Se deben tener en cuenta los siguientes factores clave al monitorear el funcionamiento de una planta de mezcla de tambor de contraflujo:

- El nuevo agregado debe introducirse en el extremo superior del secador de contraflujo sin obstrucciones. Para ello se puede utilizar una rampa inclinada o giratoria.

- El RAP se introduce en la unidad de mezcla antes del quemador para una planta convencional de mezcla de tambor de contraflujo y debajo del quemador en la carcasaexterior para una planta de doble barril.

- En general, el RAP debe ingresar a la unidad de mezcla antes de que el relleno mineral y los finos de la cámara de filtros se introduzcan en la cámara de mezcla.

- El cemento asfáltico debe cargarse en la unidad de mezcla después de que se haya producido alguna transferencia de calor entre el nuevo agregado sobrecalentado y el RAP. Si también se agrega relleno mineral o finos de cámara de filtros a la mezcla, el materialaglutinante debe inyectarse en el área de mezcla después de que hayan ingresado los aditivos.

- La mezcla de HMA que se descarga de la unidad de mezcla debe ser muestreada para asegurar que los componentes de la mezcla estén completamente mezcladosy adecuadamente recubiertos con cemento asfáltico.

SECCIÓN 11

Silos de bombeo y almacenamiento y técnicas de carga de camiones

El propósito principal de un silo en una planta por lotes es permitir que la planta continúe produciendo material cuando los camiones no están disponibles para aceptar la mezcla directamente desde el molino. Para una operación de planta de mezcla de tambor (ya sea de flujo paralelo o contraflujo), el propósito principal del silo es convertir una operación de mezcla continua en un proceso de carga de camión discontinuo o por lotes y retener la mezcla temporalmente hasta que esté disponible el próximo vehículo de transporte. En esta sección se describen los tipos de silos y los diseños de silos, así como las operaciones de carga y descarga de mezclas. En todo momento se hace hincapié en las medidas adoptadas para prevenir la segregación, definida como la separación de las partículas de áridos más gruesas de la mezcla del resto de la mezcla. La sección termina con un resumen de los factores clave que deben tenerse en cuenta en el monitoreo de las operaciones de carga de silos y camiones

TIPOS DE SILOS Y DISEÑOS DE SILOS

Aumento frente a silos de almacenamiento

Durante el funcionamiento diario normal de una planta de HMA, se puede utilizar un silo para almacenar la mezcla asfáltica entre las llegadas de los camiones a la planta. En este caso, el silo suele denominarse silo de sobretensión. Si el silo se va a utilizar para mantener la mezcla durante períodos de tiempo más largos (varias horas o más), se puede denominar silo de almacenamiento. Un silo de almacenamiento puede utilizarse fácilmente como silo de compensación, pero un silo de compensación puede no ser adecuado para su uso como silo de almacenamiento.

Hay varias diferencias entre los dos tipos de silos. En primer lugar, la capacidad de un silo de almacenamiento suele ser mayor que la de un silo de sobretensión. En segundo lugar, un silo de compensación generalmente está aislado, pero no calefactado, mientras que un silo utilizado para el almacenamiento de mezclas siempre está bien aislado y generalmente se calienta, ya sea total o parcialmente. En tercer lugar, las compuertas en la parte inferior de un silo de almacenamiento se calientan y sellan cuando la mezcla se va a mantener durante un largo período de tiempo; Esto se hace para reducir la cantidad de aire que puede pasar a la mezcla a través de las compuertas. Por otro lado, la parte inferior de un silo de sobretensión normalmente no se calienta ni se sella.

Sin embargo, el funcionamiento principal de ambos tipos de silos es similar. Solo la capacidad de almacenar cantidades de mezcla durante períodos de tiempo más largos sin cambios significativos en las propiedades de mezcla diferencia los dos tipos. Independientemente del tipo de silo utilizado, la mezcla que se mantiene en el silo y luego se entrega al camión de transporte debe cumplir con las mismas especificaciones y requisitos que la que se descarga directamente desde el molino en una planta de lotes o desde el extremo de descarga de la mezcladora de tambor antes de pasar dentro y fuera del silo

Aislamiento y calor

Como se ha señalado, la mayoría de los silos de sobretensión están aislados; Esto se hace para reducir la pérdida de calor de la mezcla, ya que reside temporalmente en el silo. El tipo de material aislante utilizado y su grosor varían entre los fabricantes de silos.

El cono en la base de un silo de compensación generalmente se calienta para evitar que la mezcla se pegue a la pared del cono y se acumule. El calor puede ser proporcionado por un sistema eléctrico o de aceite caliente. En algunos casos, las paredes verticales del silo también se calientan para que la mezcla pueda conservar la temperatura deseada durante un período prolongado de tiempo. Si el silo se va a utilizar estrictamente como un silo de compensación y se vacía de mezcla al final de cada día de producción, generalmente no es necesario calentar las paredes del silo.

Almacenamiento

Si una mezcla de asfalto debe mantenerse en el silo durante la noche o un fin de semana, esto generalmente puede lograrse con éxito sin un endurecimiento excesivo ni una pérdida significativa de temperatura en la mezcla. Se requiere un silo bien aislado, pero en general no es necesario calentar las paredes verticales del silo. Las mezclas almacenadas durante varios días en silos equipados con conos calefaccionados han mostrado una oxidación y pérdida de temperatura mínimas. La cantidad de endurecimiento que ocurre está relacionada con la cantidad de mezcla en el silo. Una gran masa de mezcla en un silo lleno envejece menos que un pequeño volumen de mezcla en un silo casi vacío. La cantidad de pérdida de temperatura en la mezcla almacenada dependerá de varios otros factores, incluidos la temperatura inicial de la mezcla, la gradación del material y las condiciones ambientales.

La mezcla de asfalto (excepto las mezclas con un alto contenido de agregado grueso, incluidas las capas de fricción, el asfalto de matriz de piedra y las mezclas Superpave de gradación gruesa) puede almacenarse durante una semana si se mantiene en un silo calentado y con aire...

Silo hermético. Se puede utilizar un sistema de gas inerte para purgar el silo de oxígeno, aunque esto rara vez se realiza. Sin embargo, las compuertas en la parte inferior del silo, así como cualquier apertura en la parte superior, deben estar bien selladas para evitar el movimiento de aire hacia y a través de la mezcla. El silo también debe estar completamente calentado y muy bien aislado. Las mezclas con un alto contenido de agregados gruesos pueden tender a experimentar segregación por drenado si se almacenan.

Si la mezcla va a almacenarse en un silo durante más de 2 o 3 días, como durante un fin de semana largo o debido a condiciones climáticas adversas, es recomendable retirar una pequeña cantidad de mezcla [al menos de 2 a 3 toneladas métricas (2 a 3 toneladas)] del silo cada día o cada dos días durante el período de almacenamiento. Esto asegura que la mezcla en el fondo del cono no se endurezca y se vuelva imposible de descargar. Si la mezcla se deja sin mover durante varios días, puede formarse un tapón de mezcla fría. Cuando finalmente se abran las compuertas de descarga, no sucederá nada: la mezcla se habrá endurecido y no fluirá fuera del silo. La pequeña cantidad de mezcla retirada del silo puede colocarse en la pila de RAP (asfalto recuperado) para su posterior reciclaje.

Aunque la mezcla puede almacenarse durante períodos relativamente largos, rara vez es necesario hacerlo en una planta de operación continua. Por lo tanto, la mayoría de los silos se utilizan como silos de amortiguación o, de manera periódica, para el almacenamiento nocturno del material asfáltico. La mezcla que se almacene por más de 2 o 3 días en un silo debe ser probada para garantizar que cumpla con todas las mismas especificaciones y requisitos que la mezcla entregada directamente en el lugar de pavimentación. Estas pruebas deben incluir la medición de la temperatura de la mezcla al descargarse del silo y las propiedades del cemento asfáltico recuperado de la mezcla. Siempre que la mezcla cumpla con las especificaciones, no debería restringirse el tiempo durante el cual el material puede mantenerse en el silo. Tal restricción aumenta el costo de la mezcla y reduce la eficiencia de la producción.

Sin embargo, si se está almacenando temporalmente una mezcla de gradación abierta, es importante mantener la temperatura de almacenamiento de la mezcla lo suficientemente baja para evitar que el cemento asfáltico se escurra del agregado (segregación por drenado) y se acumule en la parte inferior del silo, cerca de las compuertas de descarga. En general, no es recomendable almacenar una mezcla asfáltica en caliente (HMA) de gradación abierta durante la noche.

Dispositivos de Transporte

Se utiliza una variedad de dispositivos de transporte para llevar la mezcla asfáltica en caliente (HMA) desde el conducto de descarga del mezclador de tambor o la tolva debajo del mezclador de una planta de dosificación hasta el silo. El equipo más comúnmente utilizado es el transportador de arrastre con listones, como se muestra en las Figuras 11-1 y 11-2.

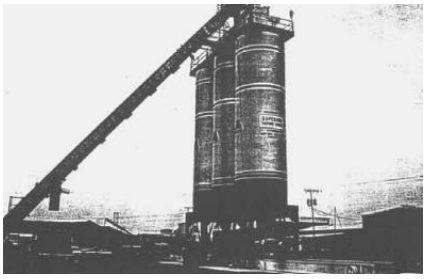


FIGURA 11-1 Transportador de listones alimentando silos en una planta de HMA.

En este sistema, un conjunto continuo de paletas conectadas por una cadena de arrastre transporta la mezcla hacia arriba a través de un conducto metálico inclinado. La cantidad de mezcla que pueden transportar las paletas de arrastre depende de la separación entre las paletas, la profundidad de cada paleta individual, el ancho de las paletas y la inclinación del transportador, así como del tamaño y la velocidad de la cadena de arrastre y la potencia del motor de accionamiento. En algunos transportadores de arrastre con paletas, la velocidad del transportador se puede ajustar para cambiar la capacidad del dispositivo y adaptarse mejor a la producción de la planta.

También se puede utilizar un transportador de banda para llevar la mezcla al silo. Esta banda es esencialmente la misma que las que transportan el agregado entrante hacia el mezclador de tambor o el secador, excepto que está diseñada para soportar la temperatura elevada del material de mezcla caliente. Un transportador de banda no puede operar en un ángulo tan pronunciado como un transportador de

listones. Como se muestra en la Figura 11-3, en algunas plantas también se utiliza un elevador de cangilones. Este dispositivo es similar al equipo utilizado

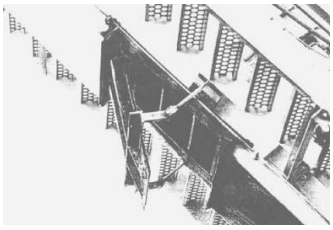


FIGURA 11-2 Tubería de caída en el transportador de listones.

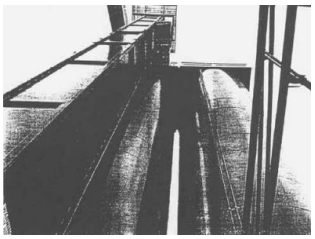


FIGURA 11-3 Elevador de cangilones alimentando silos.

en plantas discontinuas para transportar el agregado caliente desde el extremo de descarga del secador hasta la parte superior de la torre de mezcla.

El tipo de equipo de transporte empleado rara vez es un factor importante en la uniformidad de la mezcla entregada al silo. El factor importante es la manera en que la mezcla sale del dispositivo transportador y es entregado en la parte superior del silo, como se analiza más adelante en esta sección.

Geometría Del Contenedor

Los silos vienen en una variedad de formas. La gran mayoría de los silos que se utilizan actualmente son circulares, pero también pueden ser ovalados, elípticos, rectangulares o cuadrados. La forma del silo puede afectar la cantidad de segregación que ocurre tanto durante la carga como durante la descarga del silo

. Generalmente, se encuentra menos segregación de una mezcla dada con silos circulares que con los de otras formas. En el caso de los silos circulares, la probabilidad de problemas de segregación con mezclas que contienen agregados gruesos de mayor tamaño aumenta a medida que aumenta el diámetro del silo. Sin embargo, en general, la geometría del silo no es un factor importante en la segregación; la forma en que se opera el silo (carga y descarga) tiene un mayor efecto en la uniformidad de la mezcla y la cantidad de segregación.

Cono De Silo

El fondo del silo de reserva tiene forma de embudo o cono. A veces, el cono es visible y, a veces, está cubierto con una lámina de metal, como unaextensión hacia abajo de las paredes laterales del silo.El ángulo del cono varía según el fabricante, pero suele estar entre 550 y 700°. Está pendiente garantiza que la mezcla se deposite como una masa en elcamión. El ángulo debe ser lo suficientemente pronunciado y las aberturas de las compuertas lo suficientemente grandes para garantizar que las partículas de agregado más grandes no rueden hacia el centro del cono (rata) a medida que la mezcla se arrastra hacia abajo, causando segregación.

La mayoría de los silos de compensación cuentan con indicadores de nivel bajo que alertan cuando la mezcla se aproxima al límite superior del cono. Mantener el volumen por encima de este nivel ayuda a reducir la segregación aleatoria. Si la mezcla desciende demasiado, las partículas grandes tienden a rodar hacia el centro, generando bolsas de segregación visibles tras la pavimentadora.

ENTREGA MIXTA

La segregación ocurre más comúnmente en mezclas que contienen una proporción significativa de agregados grandes o que están granuladas. La separación real de las partículas grandes y pequeñas ocurre cuando la mezcla de asfalto se coloca en una pila cónica dentro del silo y las partículas más grandes se deslizan por el costado de la pila, acumulándose alrededor del borde inferior. La segregación también puede ocurrir cuando toda la mezcla que se descarga del dispositivo transportador se arroja a un costado del silo, lo que permite que las piezas más gruesas regresen a través del silo hacia la pared opuesta.

Recientemente, se ha identificado como un problema el enfriamiento diferencial de la mezcla como resultado de la segregación de materiales. El tema se aborda en el análisis de la segregación en la Sección 13.

Segregación en la parte superior del silo

La segregación en la calzada suele ser el resultado de la operación en la parte superior del silo. La mezcla que se entrega a la parte superior del silo mediante un

transportador de listones, una cinta transportadora o un elevador de cangilones se descargará a los lados del silo, como se ilustra en la Figura 11-4, a menos que se emplee algún medio para redirigir el flujo hacia el centro del silo. En algunos silos, se utiliza una serie de deflectores para contener y cambiar la dirección del material. Otros silos están equipados con un sistema divisor para dividir la mezcla a medida que se entrega, lo que hace que una parte de la mezcla se coloque en cada parte del silo. En general, el uso de un sistema divisor o de deflectores puede reducir la tendencia a la segregación en la calzada, pero no siempre la elimina. El uso de un sistema dosificador generalmente proporciona un mejor medio para resolver el problema de la segregación (consulte la Figura 11-5).

En este sistema se utiliza una tolva de retención temporal en la parte superior del silo para almacenar momentáneamente la mezcla que transporta el dispositivo transportador. Esta tolva recoge el flujo continuo de mezcla

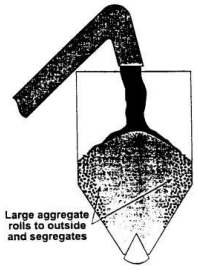


FIGURA 11-4 Segregación en la parte superior del silo sin dosificador.

Cuando la tolva está casi llena y se abren las compuertas, la mezcla se deposita en el silo en una masa. La masa de mezcla toca el fondo del silo vacío o la parte superior de la mezcla que ya está en el silo. Al entrar en contacto, la mezcla se dispersa en todas las direcciones de manera uniforme, lo que minimiza la segregación. Mover HMA en una masa siempre minimizará la segregación.

FIGURA 11-5 Uso de dosificador para evitar la segregación en la parte superior del silo.

El sistema de dosificación funciona bien, salvo cuando el silo está casi lleno. En ese caso, la mezcla cae sin suficiente impulso, formando una pila cónica que puede iniciar la segregación al acumularse más mezcla. Por ello, la mayoría de los silos cuentan con indicadores de nivel alto que advierten al operador para detener el flujo cuando el silo está demasiado lleno.

El dosificador no puede evitar la segregación si la mezcla se entrega incorrectamente. Si el transporte deposita toda la mezcla en un lado de la tolva, como en la Figura 11-6, el agregado grueso tiende a rodar dentro del dosificador y provoca una caída descentrada en el silo. Para evitar la segregación en mezclas con alto contenido de agregado grueso, es esencial depositar la mezcla uniformemente en el centro de la tolva y entregarla al centro del silo.

El dosificador incluye un temporizador que regula la apertura periódica de las compuertas inferiores del silo, ajustándose a la tasa de producción de la planta. Configurado correctamente, evita que el dosificador se llene demasiado o se vacíe por completo, permitiendo un transporte continuo y evitando descargas directas del transportador al silo.

Si el temporizador falla, el dosificador puede recibir demasiada mezcla antes de que se abran las compuertas de descarga. Esto puede causar que el material HMA se desborde, retrocediendo hacia el transportador y sobrecargándolo hasta detener su funcionamiento, obligando a la planta a interrumpir sus operaciones.

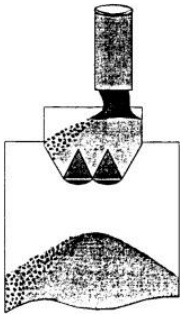


FIGURA 11-6 Segregación causada por un dosificador de alimentación descentrado.

el correcto funcionamiento del dosificador es esencial para evitar problemas de segregaciónen la mezcla. Si las compuertas inferiores permanecen abiertas indebidamente, la mezcla gotea continuamente hacia el silo, anulando el propósito del dosificador.

Otro problema común ocurre cuando el dosificador se vacía con demasiada frecuencia y sin estar lleno, lo que reduce la masa de material que cae en el silo de una sola vez y aumenta la posibilidad de formar una pila cónica de mezcla. Para prevenir esto, el temporizador debe ajustarse adecuadamente, cerrando las compuertas antes de que el dosificador esté completamente vacío, asegurando así una descarga en masa y minimizando la segregación.

La capacidad del dosificador, situada en la parte superior del silo, varía entre 2 y 5 toneladas, dependiendo de la capacidad de producción de la planta. Por su parte, un camiónde transporte típico puede cargar entre 14 y 20 toneladas. Esto significa que se requieren entre3 y 11 gotas del dosificador para completar una carga, dependiendo de su capacidad y la del camión. Este procedimiento asegura unadistribución uniforme y controlada de la mezcla durante el proceso de carga.

Segregación longitudinal (de lado a lado)

La segregación longitudinal (de un lado a otro) ocurre en un extremo del carril que se está pavimentando cuando las partículas de árido más grandes tienden a desplazarse hacia un lado del silo. Esto depende de cómo se introduce la mezcla en el silo desde el sistema de transporte: las partículas gruesas del árido pueden acumularse en el mismo lado o en el lado opuesto del silo respecto al transportador. En ambos casos, estas partículas terminan descendiendo por un lado del silo, acumulándose en un costado del camión de transporte y, finalmente, en un extremo de la máquina pavimentadora.

Este tipo de segregación suele concentrarse en un solo lado de la extendedora y, si la planta opera de manera constante, será relativamente uniforme en ese lado. Una forma sencilla de identificar la causa de esta segregación es cambiar la dirección en la que se carga el camión bajo el silo. Así, se puede observar si el patrón de segregación cambia de lado en la extendedora. Por ejemplo, si la segregación aparece en el lado izquierdo del carril al pavimentar y el camión se carga en la dirección habitual, será necesario invertir la dirección de carga del camión. Cuando la mezcla se descarga enla tolva de la extendedora, ya sea directamente desde el camión o a través de una máquina de distribución y recogida, la segregación debería trasladarse al lado contrario (el derecho).

CARGA DE CAMIONES DESDE SILOS

Al igual que es crucial depositar la mezclaasfáltica de forma uniforme en el centro del silo para evitar la segregación longitudinal, también es fundamental distribuir la mezcla en diferentes puntos de la plataforma del camión de transporte. Esto ayuda a prevenir la segregación entrecamiones o en las últimas etapas de la carga.

La mayoría de los silos cuentan con una única abertura de descarga, equipada con compuertas simples o dobles. Para garantizar un flujo continuo, las compuertas inferiores deben abrirse de forma rápida y completa, permitiendo que la mezcla fluya sin restricciones. Una vez que se ha cargado el peso adecuado en el camión, las compuertas deben cerrarse con prontitud. En los silos con compuertas dobles (bivalvas), este cierre suele ser efectivo. Sin embargo, en los silos con una sola compuerta, puede ocurrir que la mezcla salga disparada hacia un lado de la plataforma del camión al cerrarse. Para evitar este inconveniente, es esencial que la compuerta se cierre lo más rápido posible.

Algunos silos están diseñados con dos aberturas de descarga independientes. Esto permite distribuir la mezcla a lo largo de una mayor superficie de la plataforma del camión,reduciendo la probabilidad de segregación. Las compuertas de estos silos pueden estar orientadasen paralelo o perpendicularmente a la dirección del camión. Ambos sistemas funcionan eficientemente siempre que se controle la cantidad adecuada de mezcla y se deposite en los puntos correctos de la plataforma del vehículo.

La segregación puede minimizarse moviendo la mezcla en bloques compactos y limitando la distancia que recorren las partículas de árido grueso. Realizar múltiples descargas endiferentes partes del camión es una estrategia eficaz para mantener la mezcla homogénea y reducir los niveles de segregación. Algunas plantas están equipadas con sistemas automáticos que controlan el proceso de carga. En estos casos, se registra el número del camión en el sistema informático, que luego administra las cargas en intervalos predeterminados y con cantidades precisas de mezcla en cada descarga.

En un sistema manual, el operador debe calcular el tiempo necesario para descargar la cantidad adecuada de mezcla en cada sección del camión. Esto se logra cronometrando las descargas y comparando esos tiempos con el peso de la mezcla entregada. Dado que los camiones varían en tamaño, tanto el tiempo por descarga como el número de descargas por vehículo pueden diferir. Sin embargo, con experiencia, el operador puede estimar con precisión estos tiempos y confirmar visualmente la cantidad de mezcla observando la altura de la pila acumulada durante el proceso de carga.

Es importante evitar prácticas como el "rellenado" de la carga mediante pequeñas cantidades de mezcla adicionales. Las compuertas del silo no deben abrirse y cerrarse constantemente para suministrar porciones mínimas de mezcla, ya que esto incrementa el riesgo de segregación. Esta práctica, común en plantas donde los silos se encuentran directamente sobre básculas, ocurre cuando el operador intenta ajustar la carga al límite legal observando las lecturas de peso en la consola de control. Durante este proceso, las partículas más grandes tienden a rodar hacia los extremos de la plataforma del camión, aumentando la segregación. Este problema puede evitarse con unsistema de descarga programado, lo que reduce significativamente el riesgo de segregación.

En algunos silos, se utilizan tolvasdosificadoras ubicadas bajo el cono. Estas tolvas, que suelen estar montadas en células de carga para medir con precisión la cantidad de mezcla descargada, deben distribuir la mezcla en diferentes secciones de la plataforma del camión. Esto limita la distancia que recorren las partículas gruesas y minimiza la segregación. Es esencial ajustar el tamaño del lote descargado desde la tolva según las necesidades de cada sección del camión. Dependiendo de la capacidad de la tolva y el tamaño del camión, pueden requerirse múltiples lotes en cada posición de carga. No se debe usar la tolva para rellenar pequeñas cantidades de mezcla en las secciones ya cargadas del camión.

Camiones basculantes

Cuando la mezcla se deposita en el centro de la plataforma de un camión volquete, tiende a formar una pila cónica. En la mayoría de los casos, debido a las leyes de peso de carga y la cantidad de mezcla asfáltica (HMA) permitida en los ejes traseros, esta se deposita ligeramente por delante del centro de la caja del camión. Esto limita el desplazamiento de las partículas de árido grueso hacia la parte delantera de la caja, pero aumenta su movimiento hacia el portón trasero.

El problema surge cuando los áridos gruesos acumulados en la parte trasera son los primeros en ser entregados a la tolva de la extendedora, mientras que los acumulados en la parte delantera se depositan al final. Esto genera una segregación entre cargas consecutivas. Los áridos gruesos que salen al final de una carga se mezclan con los que ingresan primero de la siguiente, creando variaciones en la calidad del material extendido.

Generalmente, los camiones se cargan con una sola gota de mezcla, distribuida hacia adelante en la plataforma. Esto contribuye a que la mayor parte de la segregación ocurra al inicio de la descarga de la siguiente carga, cuando el material acumulado en la parte trasera del camión se entrega primero a la extendedora. Por lo tanto, la segregación no depende tanto de lo último que sale de una carga, sino de lo primero que entra dela siguiente. Este patrón puede ser problemático para garantizar una distribución uniforme de los áridos en la superficie pavimentada, afectando la calidad del pavimento final.Como se ha indicado anteriormente, este problema de segregación se puede minimizar significativamente dividiendo la entrega de la mezcla asfáltica desde el silo en varias gotas, cada una de ellas entregada a una sección diferente de la plataforma del vehículo de transporte. Si se utiliza un camión volquete de eje tándem o triaxial, alrededor del 40% del peso total de la mezcla a transportar debe cargarse en el centro de la mitad delantera del camión. A continuación, se debe tirar del camión hacia delante para que el siguiente 40% de la carga total pueda depositarse en el centro de la mitad trasera de la caja, cerca del portón trasero. A continuación, el vehículo debe desplazarse hacia atrás para que el 20% restante de la mezcla pueda depositarse en el centro de la plataforma, entre los dos primeros montones.

Una queja comúnmente expresada sobre este tipo de procedimiento de carga es que el conductor del camión debe retroceder por debajo del silo para cargar la parte trasera de la plataforma. Sin embargo, el mismo conductor tendrá que retroceder el camión una vez que llegue al lugar de extendido para entregar el HMA en la tolva de la extendedora. Otra afirmación es que se tarda más en cargar el camión cuando se utilizan varias gotas que cuando se utiliza una sola gota de mezcla. Aunque esto es cierto, el número total de toneladas

de aglomerado producidas cada día estará casi siempre limitado por la capacidad de la planta y no por el tiempo necesario para cargar el camión que se tarda en cargar los camiones individuales. Si se quiere eliminar la segregación, el conductor del camión tendrá que aprender a mover el vehículo de transporte de un lado a otro por debajo del silo y permitir que la mezcla se deposite en los lugares adecuados de la plataforma del camión para reducir la distancia que pueden rodar los trozos de árido grueso.

Si se utiliza un camión volquete grande para entregar la mezcla, deberá aumentarse el número de gotas de material del silo para distribuir la mezcla a lo largo de la plataforma del camión. La primera gota de mezcla debe caer en la parte delantera de la plataforma y la segunda cerca del portón trasero. El resto de la mezcla se repartirá uniformemente a lo largo de la caja del camión. En ningún caso se debe cargar el camión de forma continua mediante el avance del conductor del camión por debajo del silo mientras se descarga la mezcla. Esta práctica hará que las partículas gruesas de aglomerado rueden hacia la puerta trasera del camión y se acumulen en ella, aumentando la segregación. Por lo tanto, para un camión de tipo semirremolque, se deben realizar cinco descargas de mezcla en la plataforma del camión: la primera en la parte delantera del camión, la segunda en el portón trasero, la tercera en la mitad de la longitud de la plataforma, la cuarta entre la primera y la tercera descarga, y la quinta entre la segunda y la tercera descarga. Esta secuencia de carga requiere que el camionero vuelva a colocar el camión después de cada gota de mezcla y aumenta algo el tiempo necesario para cargar el camión, pero también minimiza el problema de segregación, que es lo más importante.

Debido a las leyes de peso en algunos estados, puede no ser posible depositar un lote de mezcla directamente delante de la compuerta trasera de un camión de volteo final y, aun así, escalar legalmente los ejes del camión. En este caso, el segundo lote de mezcla entregado al camión debe colocarse tan cerca de la compuerta trasera como sea posible, permitiendo al mismo tiempo que se cumplan las restricciones de peso por eje.

Debido a que los camiones tienen plataformas de diferentes longitudes, es crucial guiar al conductor para cargar la mezcla asfáltica en los puntos correctos, evitando la segregación. Un método es marcar números en la báscula del camión, separados por un pie, indicando dónde detenerse para cargar cada sección de la plataforma. Por ejemplo, el conductor puede alinear su retrovisor con el número 6 para cargar la parte delantera (bajada 1), luego avanzar hasta el número 22 para cargar cerca del portón trasero (bajada 2) y retroceder al número 14 para cargar el centro de la plataforma (bajada 3). Este sistema se adapta a camiones de diferentes tamaños ajustando las posiciones de los números.

Otro método utiliza cintas de colores en las patas del silo, colocadas a la altura del retrovisor del camión, para indicar las posiciones de carga. En un camión de eje tándem, se puede usar cinta roja. El conductor alinea el retrovisor con la cinta roja marcada como posición 1 para cargar la parte delantera. Luego avanza hasta la posición 2 para cargar cerca del portón trasero y retrocede a la posición 3 para cargar el centro. Para camiones de tres ejes, con plataformas más largas, se pueden usar cintas de diferentes colores, como azul, para señalar posiciones adicionales de carga. En semirremolques, con plataformas aún más extensas, se recomienda usar cintas amarillas para guiar al conductor y realizar cinco descargas en puntos estratégicos: la parte delantera, el portón trasero, el centro y entre estas posiciones.

Ambos métodos aseguran una distribución uniforme de la mezcla, minimizando el riesgo de acumulación de partículas gruesas en áreas específicas de la plataforma, lo que podría causar segregación. Además, proporcionan una guía clara al conductor, simplificando el proceso de carga y mejorando la eficiencia en la operación. El éxito de estos procedimientos depende de la correcta implementación de las marcas o cintas y de que los conductores sigan las indicaciones para garantizar la colocación precisa de la mezcla en cada sección de la plataforma.

Camiones con volqueta inferior o ventral

El uso de un camión de volteo inferior con una única compuerta de descarga para cargar la mezcla asfáltica (HMA) en una sola gota provoca que los áridos gruesos se segreguen. Esto ocurre cuando la mezcla se acumula en el centro de la plataforma y, al descargarse, los áridos gruesos se desplazan hacia los extremos debido a las paredes inclinadas del camión. La segregación no es inmediata, sino al final de la descarga. Este método de carga aumenta el riesgo de segregación, lo que afecta negativamente la calidad de la mezcla extendida.

de la parte superior de la carga se descargan desde las compuertas al final de la hilera. A menudo se encuentran trozos de agregado grueso en la hilera al final de la carga, lo que provoca segregación en la calzada en este punto.

La secuencia de carga adecuada para este tipo de camión es depositar alrededor del 70 por ciento del peso total de la carga en el centro de la plataforma del camión, directamente sobre la compuerta de descarga. Esta práctica da como resultado un pequeño montículo de mezcla en el centro de la longitud de la plataforma. Luego, el camión debe moverse hacia atrás y aproximadamente el 15 por ciento del peso total debe descargarse en la parte delantera del camión, entre la parte inicial de la mezcla y la pared delantera inclinada de la plataforma del camión. Una vez que esto se haya hecho, el camión debe retroceder y el 15 por ciento final del peso total debe entregarse en la parte trasera del camión, entre la parte inicial de la mezcla y la pared trasera inclinada de la plataforma del camión. Este procedimiento de carga reduce en gran medida el desplazamiento de partículas de agregado grueso hacia la parte superior delantera y trasera de la plataforma del camión y elimina la segregación que se produce cuando la mezcla en las dos esquinas (partes superior delantera y trasera) finalmente se deposita en la hilera.

Se utiliza una secuencia de carga ligeramente diferente si el camión de descarga inferior o de caja está equipado con compuertas de descarga dobles. En este caso, la primera gota de mezcla debe ser aproximadamente el 40 por ciento de la carga total y debe colocarse directamente sobre la compuerta de descarga delantera. Luego, el camión debe avanzar y depositar un segundo 40 por ciento de la carga total directamente sobre la segunda compuerta de descarga (trasera). Una vez que se haya logrado esto, el camión debe avanzar nueva y aproximadamente el 10 por ciento del peso debe colocarse en la parte superior trasera de la plataforma, entre la segunda gota de mezcla y la pared trasera inclinada de la plataforma del camión. Luego, el camión debe retroceder y la cuarta y última gota de mezcla, aproximadamente el 10 por ciento de la carga total, debe colocarse en la parte superior delantera de la plataforma, entre la primera gota de mezcla y la pared delantera inclinada de la plataforma del camión. Por lo tanto, en los camiones con volquete inferior de doble compuerta, se deben utilizar cuatro posiciones de carga diferentes para reducir la distancia que pueden recorrer las partículas de agregado grueso.

Al igual que con los procedimientos de carga de camiones con descarga en el extremo, se debe proporcionar una orientación positiva al conductor del camión con descarga en la parte inferior para que sepa dónde detener el camión debajo del silo para cargar el vehículo en tres o cuatro descargas de mezcla, según la cantidad de compuertas de descarga del camión. Nuevamente, aunque esta secuencia de carga toma más tiempo que cargar el camión en una sola descarga, este procedimiento es absolutamente necesario si se desea evitar la segregación.

Camiones con fondo móvil

En el caso de los camiones con fondo móvil (también conocidos como flow-boy o de descarga horizontal), la segregación puede ser un problema si se permite que las partículas de agregado grueso se desplacen hacia la parte trasera de la plataforma del camión, es decir, hacia la compuerta de descarga. Si este tipo de camión se carga con un movimiento lento hacia adelante, las partículas de agregado más gruesas se moverán hacia atrás, hacia la compuerta trasera, a medida que la mezcla se deposita en la plataforma. Al finalizar la carga, esas partículas gruesas se habrán acumulado en la compuerta de descarga y se entregarán primero en la tolva de la pavimentadora. Por lo tanto, para este tipo de camión, la segregación en la superficie del pavimento generalmente está relacionada con lo que sale primero de la plataforma del camión, o la segregación al comienzo de la carga.

El procedimiento de carga adecuado para un camión con fondo móvil es colocar la primera gota de mezcla en la parte trasera de la plataforma, lo más cerca posible de la compuerta de descarga. De esta manera, se minimizará la distancia que las partículas de agregado grueso pueden rodar hasta la compuerta trasera. Luego, el camión debe retroceder debajo del silo y la siguiente gota de mezcla debe colocarse lo más cerca posible del frente de la plataforma. Luego, debido a la cinta transportadora o a los transportadores de listones en la parte inferior de la plataforma del camión, el resto del peso total de la mezcla se puede depositar en la plataforma del camión mientras el camión avanza lentamente. Cuando la mezcla llega al final de la plataforma, la primera gota ya estará allí y se detendrá el movimiento de las piezas de agregado grueso.

En cuanto a los demás tipos de camiones, es necesario dar una orientación positiva al conductor del camión para que sepa el lugar adecuado en el que detenerse para permitir que la primera gota de mezcla del silo se coloque lo más cerca posible de la compuerta de descarga. Los diferentes tipos y longitudes de camiones con fondo móvil requerirán diferentes posiciones de carga debajo del silo.

RESUMEN

La segregación suele comenzar en el silo de

reserva o de almacenamiento en el proceso de carga y descarga. Los factores operativos clave que deben controlarse para evitar la segregación incluyen lo siguiente:

- La segregación en la parte superior del silo generalmente es causada por la forma en que se coloca la mezcla HMA en la parte superior del silo a medida que la mezcla se descarga del dispositivo transportador.

- La segregación longitudinal (de lado a lado) es causada por la carga del silo hacia un lado, de modo que las partículas de agregado más gruesas ruedan hacia el lado opuesto dentro del silo.

- El dispositivo de transporte desde el conducto de descarga de una planta mezcladora de tambor o la tolva debajo de la mezcladora de una planta dosificadora debe depositar la mezcla en el centro del dosificador en la parte superior del silo.

- Si hay segregación longitudinal detrás de la pavimentadora, se deben cargar varios camiones de transporte debajo del silo orientados en la dirección opuesta a su patrón de carga normal. Cuando estos camiones de mezcla se descargan en la pavimentadora, la ubicación de la segregación debe cambiar de lado en el carril que se está pavimentando. Si esto sucede, la causa de la segregación longitudinal probablemente se encuentre en el procedimiento utilizado para colocar la mezcla en el silo desde el dispositivo de transporte.

- Se debe utilizar un dosificador en la parte superior del silo. El dosificador no debe funcionar con las compuertas completamente abiertas, permitiendo que la mezcla pase directamente a través de él. El dosificador debe llenarse con la mezcla y luego debe dejar caer la mezcla en una masa en el centro del silo. Además, la compuerta en la parte inferior del dosificador debe cerrarse antes de que toda la mezcla se descargue del dosificador.

- Si el silo se va a utilizar para almacenar durante la noche la mezcla asfáltica, el cono debe calentarse y las paredes del silo deben aislarse. Si la mezcla se almacena durante más de 2 días, se debe retirar una pequeña cantidad de mezcla del silo al menos cada dos días para evitar que se obstruya el cono.

- Si la mezcla se almacena durante más de 2 o 3 días, se debe controlar la temperatura y las propiedades del cemento asfáltico recuperado de la mezcla al descargarla. La mezcla debe cumplir las mismas especificaciones y requisitos que una mezcla colocada inmediatamente después de su fabricación.

- El operador de la planta no debe llenar la carga de mezcla en el camión ni verter la mezcla en la plataforma del camión en pequeñas gotas para llenar el camión hasta su capacidad legal.

- La segregación de carga completa de camión a camión generalmente es causada por la forma en que se descarga la mezcla HMA desde el silo y dónde se entrega a lo largo de la plataforma del camión.

- Nunca se debe cargar un camión con volquete trasero en solo una gota de mezcla en el centro de la plataforma del camión. Se necesitan varias gotas de mezcla, la primera ubicada cerca del frente de la plataforma y la segunda cerca de la puerta trasera. Se debe colocar una tercera gota de mezcla en el medio de las dos primeras gotas.

- Si se utiliza un camión con volquete largo (semirremolque), se deben echar al menos cinco gotas de mezcla HMA en la caja del camión: la primera en la parte delantera de la caja; la segunda en la parte trasera de la caja, en la puerta trasera; la tercera en el medio de la longitud de la caja; y la cuarta y quinta gotas entre la segunda y la tercera y la primera y la tercera, respectivamente.

- Nunca se debe cargar un camión volcador conduciendo lentamente el camión hacia adelante mientras se entrega la mezcla desde el silo. Esto hará que las partículas de agregado más gruesas se acumulen en la compuerta trasera del camión y aumenten significativamente la cantidad de segregación que se produce.

- Si se utiliza un camión con volquete inferior o de caja, se deben utilizar tres o cuatro gotas de mezcla para cargar el camión de transporte, dependiendo de la cantidad de compuertas de descarga en la parte inferior de la plataforma.

- Si se utiliza un camión con fondo móvil, la primera gota de mezcla debe depositarse en la parte trasera del camión.

12 CONTROL DE EMISIONES

La principal fuente de emisiones de una planta de mezcla por lotes o de tambor es el arrastre de partículas finas durante el proceso de calentamiento y secado de los agregados. En esta sección se describen los tres tipos de equipos de control de emisiones que se pueden encontrar en las plantas de mezcla por lotes o de tambor: colectores secos, colectores húmedos y filtros de mangas o de tela. Si se utiliza, el colector seco suele colocarse delante de uno de los otros dos tipos y se denomina colector primario; el colector húmedo o filtro de mangas es el colector secundario a través del cual fluyen los gases de escape después de pasar por el colector primario. El colector primario se utiliza para eliminar las partículas finas más grandes de los gases de escape y reducir la carga en el colector secundario, que se utiliza para capturar las partículas muy finas.

En las plantas de mezcla por lotes y de tambor, una pequeña cantidad de agregado fino se elimina durante el proceso, y para cumplir con las normativas de calidad del aire, es necesario utilizar equipos de control de emisiones que eviten la liberación de partículas a la atmósfera. La velocidad de los gases de escape en la secadora o mezcladora depende del diámetro del tambor, la capacidad y velocidad del extractor, así como de las condiciones de operación, siendo este flujo esencial para el correcto funcionamiento del quemador y afectando la cantidad de partículas finas transportadas.

En un mezclador de tambor de flujo paralelo, la cantidad de finos transportados se puede reducir significativamente encapsulando o recubriendo el agregado con el cemento asfáltico al principio del proceso de secado. Cuanto más arriba en el tambor (hacia el quemador) se inyecte el cemento asfáltico, mayor será la cantidad de finos que se capturarán en el cemento asfáltico antes de que puedan ser transportados por el aire. Por lo general, la cantidad de finos transportados aumenta a medida que la tubería de cemento asfáltico se coloca más abajo en el tambor hacia el extremo de descarga del tambor de flujo paralelo.

La cantidad de finos que se arrastran es una función de la cantidad de material muy fino en el agregado nuevo; el tamaño, peso y contenido de humedad de los finos; y la cantidad de partículas muy finas en el RAP (si se utiliza en una planta mezcladora de tambor de flujo paralelo). La cantidad de finos también está relacionada con el funcionamiento del tambor: la tasa de producción (densidad del velo de agregado), la ubicación de la tubería de inyección de cemento asfáltico (para una mezcladora de tambor de flujo paralelo) y la velocidad de los gases de escape. La cantidad de material arrastrado puede variar ampliamente con un cambio en las propiedades del agregado entrante y la tasa de producción de la planta.

La eficiencia del equipo de control de emisiones está relacionada con la cantidad de partículas que captura el equipo en comparación con la cantidad que ingresa al equipo de control de emisiones. Si, por ejemplo, 1000 partículas por minuto ingresan a un filtro de mangas y 990 de esas partículas quedan atrapadas en el filtro, el sistema de recolección tiene una eficiencia del 99 por ciento. La eficiencia se puede determinar, en parte, observando la cantidad de partículas que se emiten desde la chimenea. Esto se hace verificando la opacidad de los gases de escape más allá del extremo de la columna de vapor (si la hay). Si se observa un rastro de polvo, se debe verificar el funcionamiento del equipo de control de emisiones.

COLECTOR SECO

Los colectores secos no se utilizan ni son necesarios en todas las plantas de asfalto. Si se utilizan, pueden ser de varios tipos, utilizados individualmente o en combinación. El colector seco original era un dispositivo ciclónico que obligaba a los gases de escape a girar dentro del colector (ver Figura 12-1). El polvo de los gases se eliminaba por fuerza centrífuga, siendo arrojado a un costado del ciclón mientras los gases se movían en un movimiento circular. El funcionamiento de un colector seco ciclónico se muestra en la Figura 12-2.

La mayoría de los sistemas de colectores secos que se utilizan en la actualidad tienen una cámara de expansión combinada con un filtro de bolsas. La cámara de expansión o caja de separación (consulte la Figura 12-3) tiene un área transversal mayor que los conductos a través de los cuales pasan los gases de escape entre el secador (secador de agregados de planta por lotes o mezclador de tambor de contraflujo) o mezclador de tambor de flujo paralelo y el colector secundario.

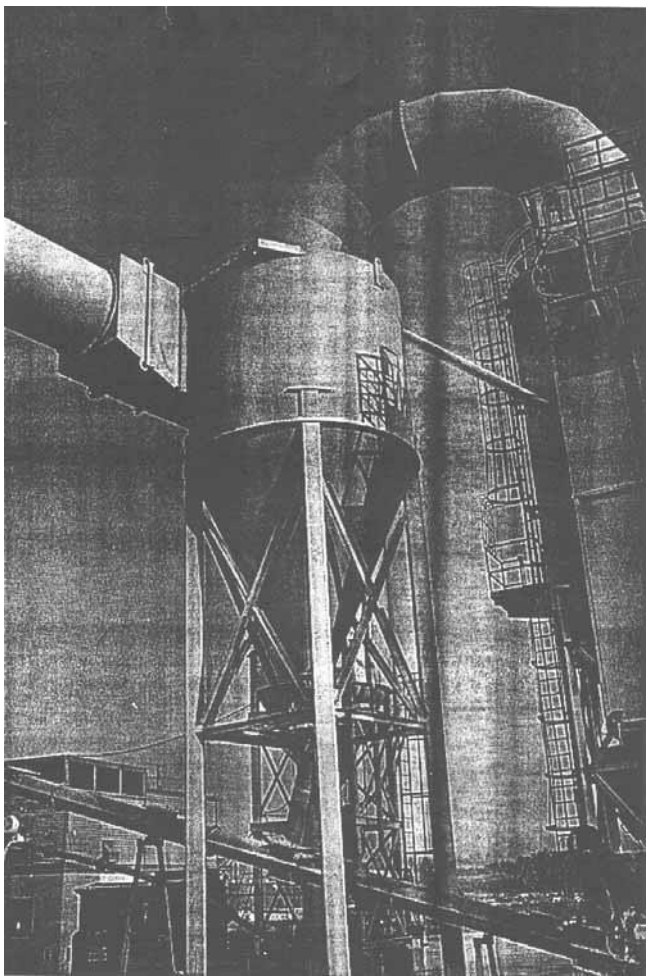


FIGURA 12-1 Colector seco ciclónico vertical.

Los gases de escape del secador o del mezclador de tambor viajan a través de los conductos hasta el extremo frontal del colector de impacto. En ese punto, la velocidad de los gases de escape disminuye significativamente al entrar en el área expandida. La cantidad de polvo que se separa del flujo de gases está directamente relacionada con el tamaño de la cámara de expansión y la reducción en la velocidad de los gases. La velocidad de las partículas más grandes disminuye de tal manera que las partículas de movimiento más lento caen al fondo de la cámara de expansión. Las partículas recolectadas pueden ser devueltas uniformemente a la planta de mezcla o al mezclador de tambor, ya sea solas o en combinación con las partículas finas recolectadas por el filtro de mangas, o pueden desecharse.

La eficiencia del colector seco depende, en parte, del tamaño de las partículas finas en los gases de escape y del tipo de colector utilizado. Los colectores primarios pueden tener una eficiencia (porcentaje de partículas finas removidas de los gases de escape en comparación con la cantidad total de partículas finas en los gases) tan baja como el 50 % en el caso de un colector de impacto, y tan alta como entre el 70 % y el 90 % cuando se utiliza un ciclón seco. Por lo tanto, solo una parte de las partículas finas en los gases de escape es eliminada por este equipo. El propósito principal del colector seco es mejorar la operación del colector secundario al reducir la carga de partículas finas en el colector húmedo o en el filtro de mangas.

COLECTOR HÚMEDO

Después de pasar por un colector seco primario (si se utiliza), los gases de escape en la mayoría de las plantas más modernas equipadas con un sistema de colector húmedo (lavador húmedo) son forzados a través de una abertura estrecha, o venturi, como se muestra en la Figura 12-5.

Cuando el flujo de gases se concentra en un área pequeña, se rocía con agua desde múltiples boquillas, humedeciendo las partículas finas. Los gases de escape y las partículas finas húmedas luego viajan hacia la sección separadora del colector.

Los gases de escape son dirigidos alrededor de la circunferencia de la unidad en un movimiento circular, como se ve en la Figura 12-5. Las partículas finas humedecidas, que han aumentado de peso debido al agua añadida, son eliminadas del flujo de gases por fuerza centrífuga y caen al fondo del colector. El gas limpio continúa girando alrededor del colector hasta llegar al extremo, donde pasa a la chimenea y luego es expulsado a la atmósfera.

Dependiendo del tamaño de las partículas finas en los gases de escape, un sistema de colector húmedo generalmente tiene una eficiencia del 90 al 99 % en la eliminación de partículas de esos gases. Además de estar relacionada con el tamaño y la cantidad de partículas finas presentes, la eficiencia depende tanto de la limpieza como del volumen de agua utilizado para rociar los gases de escape. Si el agua rociada está limpia y libre de sedimentos, y si todas las boquillas del lavador están abiertas y funcionando, la cantidad de partículas finas eliminadas por el sistema de colector húmedo, y por ende la eficiencia, aumentará.

La limpieza del agua y el estado de las boquillas están relacionados, a su vez, con el tamaño del estanque de sedimentación utilizado para recolectar el agua descargada del lavador. El agua y las partículas finas, en forma de lodo, se envían desde el fondo del colector a través de una tubería hacia la primera sección del estanque, donde las partículas más pesadas se asientan

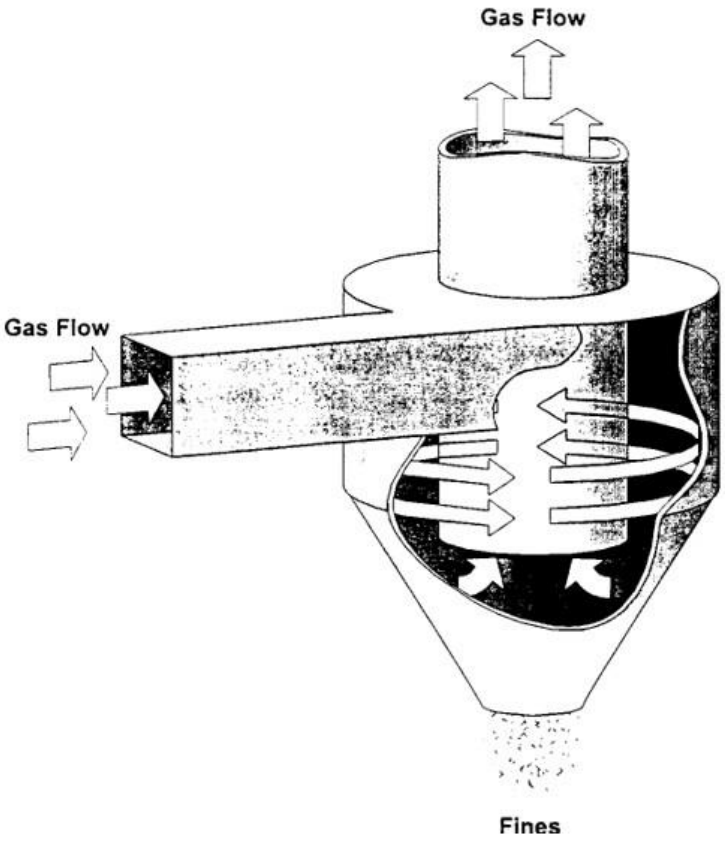


FIGURA 12-2 Flujo a través de un colector seco de ciclón típico

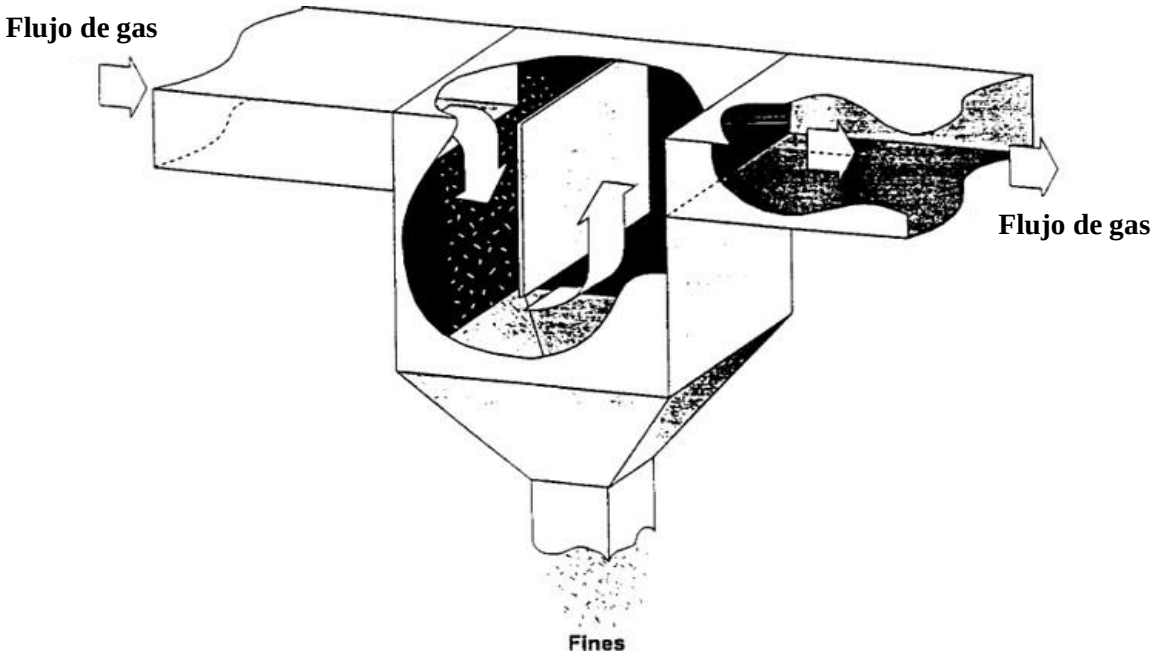


FIGURA 12-3 Flujo a través de un colector de impacto típico.

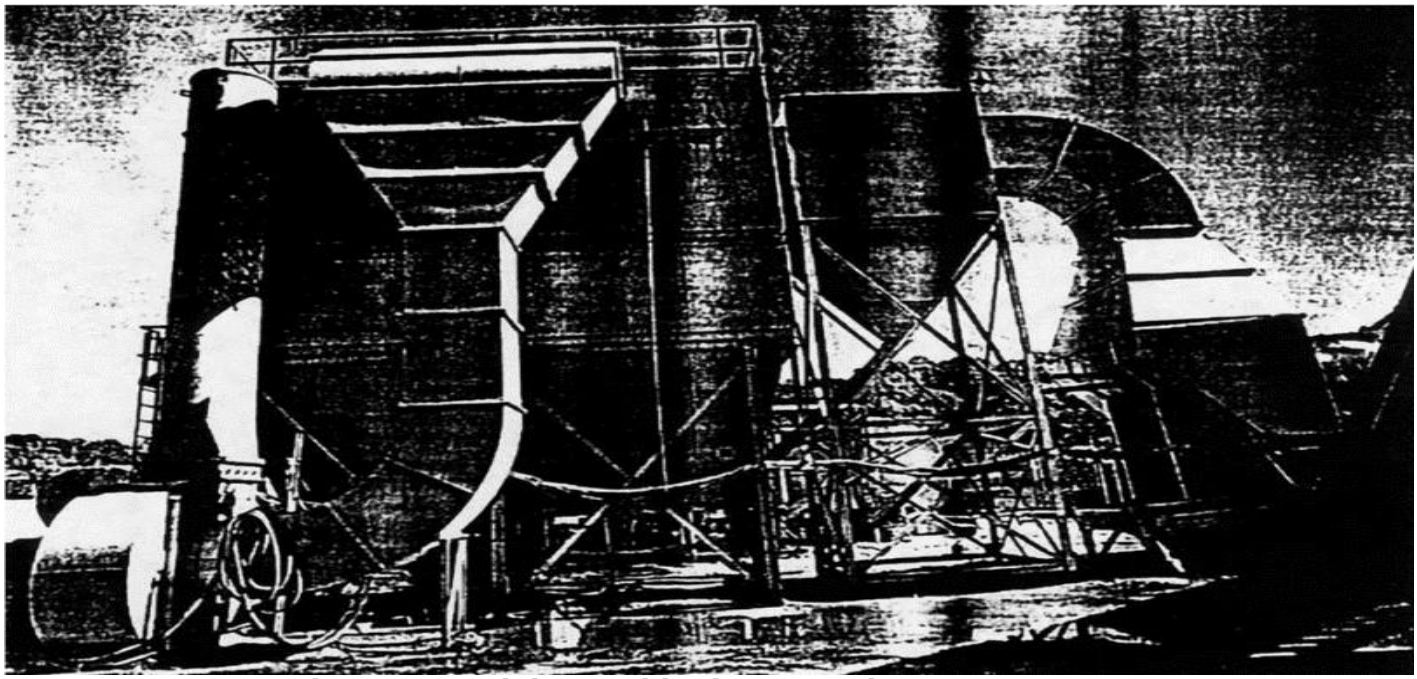


FIGURA 12-4 Caja de impacto instalada antes del Colector Secundario

en la parte superior del estanque en esta primera sección se extrae a través de una salida en el lado opuesto del estanque. En cada sección sucesiva del estanque ocurre una mayor sedimentación de partículas finas.

La eficiencia del proceso de sedimentación está directamente relacionada con el tamaño del estanque de sedimentación: cuanto más grande y profundo sea el estanque, más agua estará disponible y más tiempohabrá para que las partículas finas se separen y sedimenten antes de que el agua del filtro de mangas. Sebombea del estanque de regreso a la unidad de colectorhúmedo. Un estanque de sedimentación se ilustra en la Figura 12-6. A medida que el estanque de sedimentación se llena de finos, el tiempo que el agua permanece en el estanque y la cantidad de sedimentación que puede ocurrir disminuyen. Cuando un estanque se vuelve demasiado poco profundo, el agua sucia se enviará de regreso al scrubber. Para mantener un suministro de agua limpia para su uso en elequipo de recolección de finos, los sedimentos en el fondo del estanque deben ser eliminados periódicamente. Además, el agua perdida del estanque através de la evaporación y las fugas en el sistema de tuberías debe ser reemplazada tan a menudo como sea necesario. Cualquier fino eliminado de los gases de escape por el scrubber húmedo ya no está disponible para su uso en la mezcla. La gradación de la mezcla producida en la planta de mezcla por lotes o en tambor no es la misma que la gradación del agregado nuevo y/oreclamado que entra. En la mayoría de los casos en los que la cantidad de finos extraídos no es grande, el cambio en la gradación será pequeño; sin embargo, si se captura un gran volumen de finos en los gases de escape, puede ocurrir un cambio significativo en la gradación del agregado, particularmente en los tamaños de partículas muy finas.

COLECTOR SECUNDARIO

Los gases de escape que pasan a través del colector primario pueden ser aspirados por el ventilador de escape de la planta a través de otro tipo de colector secundario llamado "baghouse" o filtro de tela, como se muestra en las Figuras 12-7 y 12-8. Cabe señalar que, aunque pueden operar sin que los gases pasen primero por un colector primario, hacerlo generalmente reduce la eficiencia del sistema y no es una práctica habitual. El material utilizado como tela filtrante es generalmente un tipo especial de fibra sintética que es resistente a altas cargas de finos, alta humedad y temperatura, mientras soporta múltiples ciclos de flexión y doblado. La tela es lo suficientemente densa como para atrapar las partículas mientras permite que el aire pase a través. La tela se convierte en una bolsa con forma cilíndrica y se coloca sobre un marco circular de metal o jaula que está cerrado en la parte inferior y abierto en la parte superior. Las bolsas filtrantes en las jaulas están dispuestas en filas dentro del colector secundario, como se ilustra en la Figura 12-9. El número de bolsas necesarias depende del tamaño del secador o mezclador de tambor

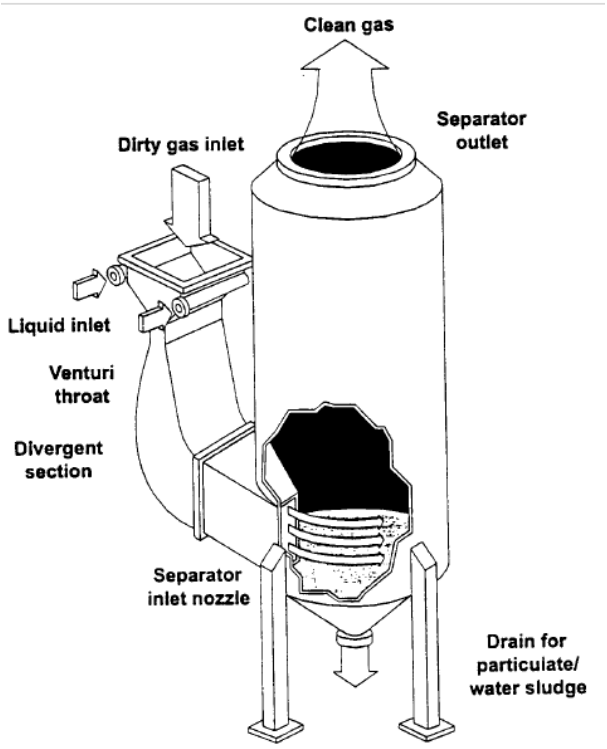


FIGURA 12-5 Flujo a través de un depurador venturi típico.

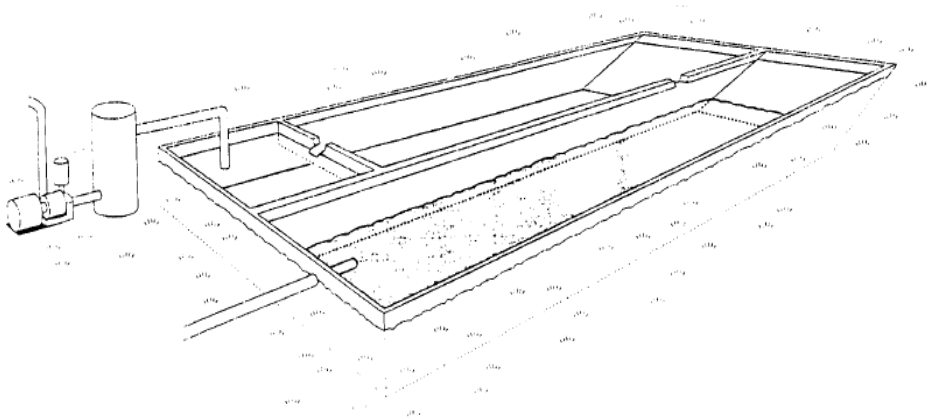


FIGURA 12-6 Balsa de decantación típica.

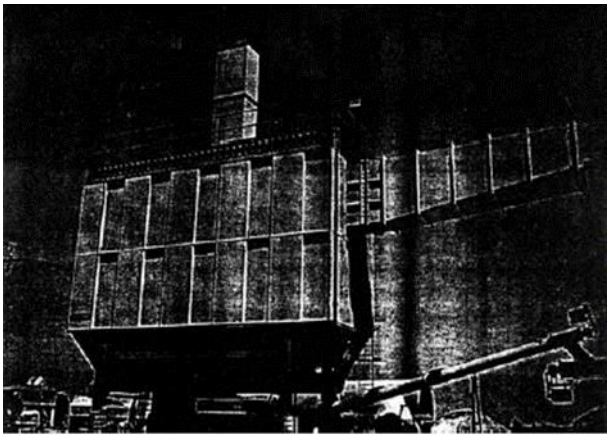


FIGURA 12-7 Cámara de filtros de chorro pulsante.

el diámetro y la longitud de las bolsas individuales, y las especificaciones de control de emisiones. Cada filtro de mangas tiene un lado de aire limpio y otro de aire sucio. El ventilador de extracción arrastra el aire sucio desde el exterior del tejido filtrante a través del material hacia el interior. Los finos quedan atrapados en la superficie exterior de la manga, y los gases de escape limpios, libres de polvo, salen por la parte superior de la manga hacia la chimenea. Con el tiempo, los finos se acumulan en el exterior de la bolsa y forman una torta o capa de polvo sobre ella.

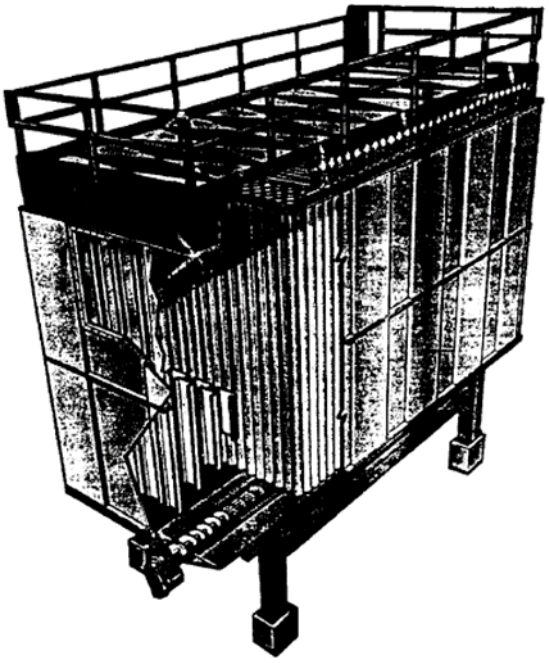


FIGURA 12-8 Vista en corte de un filtro de mangas típico.

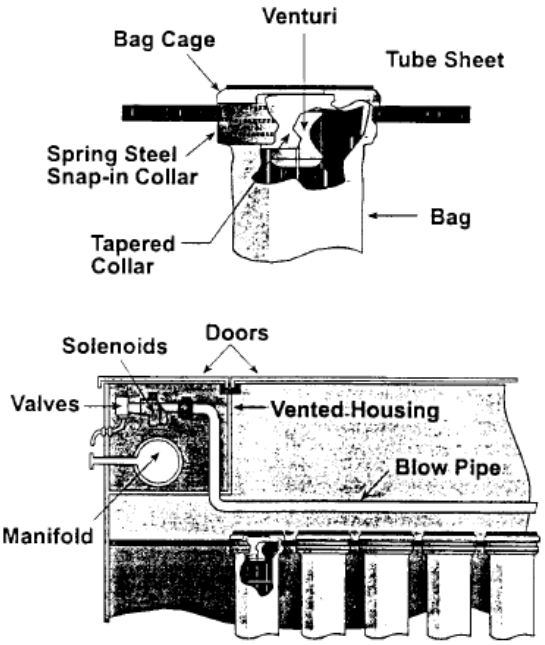


FIGURA 12-9 Cómo se montan las bolsas en la jaula, se sellan a la lámina tubular y se instalan en el filtro de mangas.

La extensión del recubrimiento de polvo determina la eficacia del filtro - si las mangas están demasiado limpias, sólo quedarán atrapados los finos más gruesos, y las partículas más finas atravesarán el tejido; si las mangas están demasiado sucias o cegadas, los gases de escape no podrán atravesar la torta de polvo, y el filtro de mangas acabará por dejar de funcionar. El espesor de la torta de polvo suele venir determinado por la frecuencia del ciclo de limpieza de las mangas filtrantes.

Para eliminar parte del polvo acumulado en las mangas filtrantes, éstas deben limpiarse periódicamente (véase la Figura 12-10). Las mangas se limpian en filas o en grupos, de modo que la mayor parte de la cámara de filtros esté en modo de recogida mientras se limpian algunas de las mangas. Para la limpieza se utiliza uno de los dos procesos principales - aire reverso o chorro pulsante. La limpieza por aire inverso se realiza haciendo pasar un gran volumen de aire a baja presión hacia atrás a través de cada saco (desde el lado limpio hacia el lado sucio) para liberar la presión sobre la torta de polvo adherida al exterior del saco y hacer que el polvo se desprenda. La limpieza por chorro pulsante se realiza inyectando un pequeño volumen de aire a alta presión en la bolsa, lo que provoca la expansión del tejido de la jaula. La expansión del tejido de la bolsa desprende la torta de polvo del exterior de la bolsa y el polvo cae al fondo del filtro de mangas.

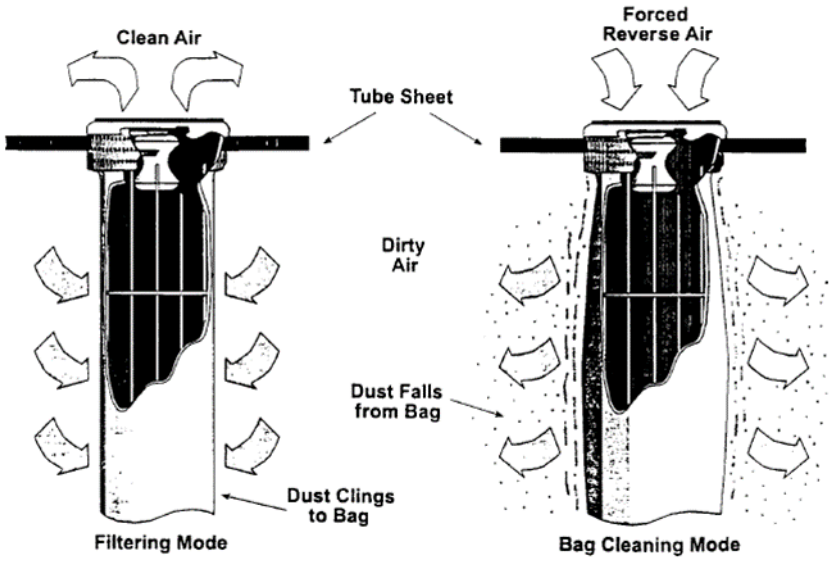


FIGURA 12-10 Bolsas filtrando aire y siendo limpiadas.

La limpieza por chorro pulsante es el método más utilizado en la mayoría de los nuevos filtros fábricos. Las partículas extraídas de las mangas se recogen para devolverlas a la planta o se desechan.

Una cámara de filtros puede eliminar hasta el 99,9% de los finos presentes en la corriente de gases de escape. Esta eficacia se mide en parte por la cantidad de caída de presión - generalmente en el rango de 50 a 150 mm (2 a 6 pulgadas) de columna de agua: entre los lados sucio y limpio de las bolsas. Si la caída de presión es demasiado baja [de 25 a 50 mm (de 1 a 2 pulgadas)], las mangas están demasiado limpias, por lo que algunas de las partículas de polvo más finas atraviesan el filtro y suben por la chimenea hasta salir a la atmósfera. Si la caída de presión es demasiado alta [superior a 150 mm (6 pulg.)], la acumulación de finos en las mangas es excesiva, los gases de escape verán restringido su paso a través del tejido y se reducirá la capacidad de la secadora o del tambor mezclador.

La eficacia del filtro de mangas se verá afectada si la temperatura de los gases de escape que entran en el filtro es inferior al punto de rocío - la temperatura de los gases de escape a la que empieza a condensarse la humedad. La humedad, combinada con los finos de los gases de escape, forma una capa de lodo en el exterior de las mangas que no puede eliminarse fácilmente durante el ciclo de limpieza de las mismas. Si esto ocurre, la caída de presión a través de las mangas aumentará significativamente, reduciendo la eficiencia de la cámara de mangas e incluso ahogando la llama del quemador en casos extremos. Para evitar que esto ocurra, la cámara de sacos debe precalentarse haciendo funcionar el quemador a “fuego lento” sin agregados en el tambor antes de que comience la producción de mezcla cada día.

Si se someten a temperaturas superiores a 225°C (440°F) durante periodos prolongados, las bolsas de fibra sintética pueden carbonizarse, desintegrarse y quemarse. Para evitarlo, se instala un sensor de temperatura y dispositivos de desconexión automática en los conductos situados antes del filtro de mangas. El sensor se suele ajustar a una temperatura de 205°C (400°F). Si la temperatura de los gases de escape supera este valor, el sensor envía una señal visual y sonora. Si la temperatura de los gases de escape supera este valor, el sensor envía una señal visual y/o acústica al operador de la planta o puede cortar automáticamente el flujo de combustible al quemador. Algunos filtros de mangas están equipados con dispositivos automáticos de extinción de incendios para controlar un incendio en caso de que se produzca en el equipo de control de emisiones.

La gradación de la mezcla asfáltica producida en una planta de mezcla por lotes o de tambor puede cambiar dependiendo de si se devuelven a la planta todos o algunos de los finos del filtro de mangas. Si se devuelve el polvo recogido, la gradación de la mezcla será aproximadamente la misma que la gradación del árido nuevo y recuperado entrante (suponiendo una degradación mínima del árido durante el procesamiento a través del secador o mezclador de tambor). Si se desperdician los finos del filtro de mangas, puede haber un cambio considerable en la gradación de la mezcla. Tenga en cuenta que, si se devuelven los finos, es importante que se introduzcan en la planta de mezcla por lotes o de tambor de forma continua y uniforme.

POLVO FUGITIVO

Aunque la principal fuente de emisiones de una planta de mezcla por lotes o de tambor es el transporte de finos,

es posible que se produzcan emisiones adicionales en forma de polvo fugitivo. Este polvo consiste en material que se escapa de la planta a través de agujeros en el equipo o conductos mientras la planta está en funcionamiento.

Para una planta por lotes, las tres fuentes más probables de polvo fugitivo son el elevador en caliente, las cribas de la planta y el molino de bolas. Cuando el árido se transporta desde el elevador caliente a la plataforma de cribas, pasa por encima de las cribas vibratorias. Este movimiento genera polvo, al igual que la mezcla de áridos en el molino de aglomerado de la planta durante el ciclo de mezcla en seco. El polvo fugitivo puede eliminarse cerrando completa y herméticamente la zona de la plataforma de cribado y reduciendo al mínimo el tiempo de mezcla en seco en la mezcladora. Además, un sistema de aire de barrido (sistema de evacuación de polvo fugitivo) crea una presión de aire negativa dentro de la carcasa de la planta y reduce en gran medida la cantidad de polvo arrastrado durante las operaciones de la planta. Este sistema suele consistir en conductos con amortiguadores ajustables que se extienden desde la plataforma de cribado, los silos calientes, la tolva de pesaje y la laminadora hasta la entrada de un ventilador de polvo fugitivo, que a continuación sopla el polvo hasta el sistema de captación de polvo. En algunas plantas no se utiliza un ventilador de polvo fugitivo; en este caso, los conductos se extienden directamente hasta la entrada del colector secundario.

Para las plantas de mezcla por lotes y plantas de mezcla en tambor, los orificios en el equipo de control de emisiones, principalmente en los conductos situados entre el extremo del secador o tambor mezclador y el colector seco o húmedo, pueden permitir el escape de partículas finas de áridos o polvo. Estos agujeros deben repararse para que todo el polvo de los gases de escape sea aspirado hacia los colectores de control de emisiones. Además, los orificios deben eliminarse para evitar que el ventilador de escape aspire aire en exceso (fugas) y reduzca la cantidad de aire disponible para la combustión adecuada del combustible en el quemador.

RESUMEN

Al supervisar el funcionamiento del equipo de control de emisiones deben tenerse en cuenta los siguientes factores clave:

- La descarga de los gases de escape de la chimenea debe observarse para ver si hay una estela de polvo al final del penacho de vapor. Si existe, debe comprobarse el funcionamiento del equipo de control de emisiones.
- Si se utiliza un depurador húmedo, deben comprobarse las boquillas de pulverización del venturi para asegurarse de que todas están abiertas y pulverizan agua correctamente.
- La limpieza del agua que vuelve a las boquillas de pulverización desde el estanque debe comprobarse en el punto en el que el agua se extrae del estanque para ser devuelta a la planta por la bomba de agua.
- Si se utiliza un filtro de mangas, la caída de presión a través de las mangas debe ser del orden de 50 a 150 mm (2 a 6 pulgadas) de columna de agua.
- La temperatura de los gases de escape que entran en el filtro de mangas debe ser inferior a 205°C (400°F). Se debe utilizar un dispositivo de cierre automático para detener el funcionamiento de la planta si la temperatura de los gases de escape supera este valor. La temperatura de los gases que entran en la cámara de filtros de mangas debe ser considerablemente inferior a este valor si el velo de agregados en el interior del secador o del tambor mezclador es correcto.
- La granulometría de la mezcla producida en la planta de mezclado por lotes o de tambor debe compararse con la granulometría utilizada en el proceso de diseño de la mezcla. La cantidad de cambio en la gradación dependerá de si se utiliza un sistema de lavado húmedo y de si los finos del filtro de mangas se devuelven a la planta o se desperdician.

PARTE III

Colocación y compactación de mezcla bituminosa en caliente

13 Entrega de mezclas

El propósito del vehículo de transporte es transportar la mezcla asfáltica desde la planta de asfalto hasta la pavimentadora. Esto debe hacerse sin demora y con un cambio mínimo en las características de la mezcla durante el proceso de entrega, y sin segregación. Se emplean tres tipos principales de camiones usualmente para transportar la mezcla asfáltica o MAC - de descarga final, de descarga inferior o de "panza" y de descarga en vivo. La carga de los tres tipos de camiones, ya sea directamente desde una mezcladora continua en una planta dosificadora o desde el silo de almacenamiento en una planta dosificadora o de mezcla continua, se analiza en la Sección 11, con énfasis en las técnicas para prevenir la segregación. Esta sección se centra en la descarga de la mezcla en el lugar de pavimentado desde cada tipo de camión; también se trata brevemente el uso de un vehículo de transferencia de material. A continuación, se revisan los procedimientos de transporte.

DESCARGA DE MEZCLA

Camiones de descarga final

Un camión de descarga final suministra la mezcla (MAC) directamente desde la plataforma del camión a la tolva de la pavimentadora. La mezcla se descarga levantando la plataforma del camión y permitiendo que la mezcla se deslice por la plataforma hasta la tolva. Cuando la plataforma está levantada, no debe entrar en contacto con la tolva y no debe ser arrastrada por ninguna parte de la pavimentadora. En los camiones de descarga final de menor capacidad, el contacto con la pavimentadora no suele ser un problema. Sin embargo, dicho contacto puede ser un problema cuando se utilizan grandes unidades tractor -semirremolque como vehículos de transporte, especialmente cuando la plataforma del camión se extiende hasta su punto más alto. Cuando una parte del peso del camión es transportada por la pavimentadora, pueden cambiar los puntos de remolque de la regla de la máquina de pavimentadora, lo que afectará a la suavidad de la capa acabada. En la Figura 13-1 se muestra un camión de descarga final típico.

También se puede utilizar un camión de descarga final para entregar la mezcla a una hilera en la carretera delante de la pavimentadora. La hilera puede formarse de dos maneras. En primer lugar, puede utilizarse una caja esparcidora o una calibradora de hileras. En este caso, la mezcla se deposita dentro de la caja y se dosifica uniformemente sobre la carretera a medida que el camión avanza, típicamente va arrastrando la caja de hileras detrás de él. La cantidad de MAC colocada en la hilera es determinada por el ajuste de la apertura de descarga de la caja. Este procedimiento proporciona el medio más preciso de mantener un suministro constante de mezcla delante de la pavimentadora. A continuación, la mezcla se recoge de la superficie de la calzada mediante un elevador de hileras acoplado a la parte delantera de la pavimentadora.

Una segunda forma de crear una hilera con un camión de descarga final es utilizar un dispositivo mezclador de hileras, que suele acoplarse a un cargador pequeño frontal. En este caso, la mezcla se vierte sobre la superficie del pavimento existente en toda la anchura de la plataforma del camión. La cantidad de MAC vertida desde el camión es controlada por el ancho de la apertura de la compuerta trasera del camión, que está encadenada para evitar que se abra completamente, y, por la velocidad de avance del camión. La mezcla se pliega en una hilera mediante la unidad de mezcla a medida que la pala cargadora la empuja hacia delante. Como resultado de la acción de agitación que se produce a medida que la mezcla se moldea en la hilera, se produce cierto remezcla del material, y la segregación puede reducirse o eliminarse. El tamaño de la hilera se controla mediante la altura de la apertura de descarga en la parte trasera de la mezcladora. Debido a la longitud de las alas de la mezcladora de la hilera, la mezcla puede ser transportada a cierta distancia si el camión deposita demasiada mezcla en algún punto de la superficie del pavimento existente.

FIGURA 13-1 Camión de descarga final típico

Camiones de descarga inferior o por panza.

FIGURA 13-2 Típico camión de descarga de fondo o "panza".

Un camión con descarga inferior o "panza" entrega su carga en la carretera delante de la pavimentadora. La mezcla se deposita desde debajo de la plataforma del camión en una hilera, tal y como se muestra en la Figura 13-2. Para este método de entrega de mezcla, es importante que se coloque la cantidad correcta de material a lo largo de la longitud de la hilera para que coincida con el ancho y profundidad del pavimento que se está colocando sin permitir que la tolva se quede sin mezcla o se sobrecargue

El funcionamiento continuo de la pavimentadora, que debe estar equipada con una máquina de recogida (elevador de hileras) (véase la Figura 13-3), sólo puede lograrse si se dispone de un suministro continuo y constante de mezcla. Sin embargo, es más difícil mantener una cantidad constante de mezcla en la tolva de la pavimentadora para las capas de nivelación de MAC, que son necesariamente de espesor variable, que para las capas cuyo espesor es más constante.

El control de la cantidad de MAC descargada desde un camión de descarga inferior está basado en el ancho de la apertura de la compuerta situada bajo el camión y en la velocidad de éste. La cantidad de mezcla depositada en cualquier momento depende en gran medida de la habilidad de la persona que controla las compuertas de descarga y de la atención del conductor del camión para que éste funcione a la velocidad requerida. El control manual de la descarga requiere una atención constante

FIGURA 13-3 Máquina de recogida de material.

para garantizar que no se introduce ni tan poca ni demasiada mezcla en la tolva de la pavimentadora (la tolva debe llenarse en todo momento hasta un nivel por encima de la parte superior de las compuertas de flujo o de las aberturas del túnel). La cantidad de mezcla necesaria en la hilera depende del ancho y el grosor de la capa que se vaya a colocar. Por lo tanto, se necesita una apertura de compuerta diferente en la plataforma del camión según las variaciones en las condiciones del proyecto y la velocidad del camión.

La cantidad de mezcla disponible para ser recogida por el elevador de hileras en la parte delantera de la pavimentadora debe ser constante. En caso de que la cantidad de mezcla que se entrega a la pavimentadora se desequilibre con la cantidad de mezcla que necesita la pavimentadora, se debe realizar un ajuste en la operación del camión de descarga inferior. Si el problema se detecta antes de que la pavimentadora esté infracargada - o sobrecargada, la cantidad de mezcla depositada en la carretera puede modificarse fácilmente cambiando el ancho de la apertura de la puerta del camión o ajustando la velocidad de avance del camión durante la descarga. En caso de que la pavimentadora se quede sin mezcla en la tolva, deberá colocarse MAC adicional en la tolva sin que la pavimentadora avance. Dependiendo del equipo de que disponga el contratista en el lugar de extendido, como una pala cargadora pequeña, hacerlo así puede resultar muy difícil. En algunos casos, el operador de la pavimentadora puede tener que levantar la regla de la pavimentadora y luego mover la pavimentadora hacia delante para recoger la mezcla. Cuando hay suficiente mezcla en la tolva, la pavimentadora debe retroceder, bajar la regla, colocar más mezcla en la hilera frente a la pavimentadora y comenzar a pavimentar nuevamente. Es innecesario decir que esta no es una buena práctica de pavimentación y generalmente no resulta en la colocación de una capa uniforme.

Si la tolva se sobrecarga de mezcla, debe retirarse parte del material de la hilera situada delante de la pavimentadora para que ésta pueda avanzar sin recoger mezcla adicional. Una vez que la mezcla de la tolva ha alcanzado el nivel deseado, la pavimentadora debe volver a recoger mezcla adicional de la hilera.

La capacidad de la pavimentadora para colocar una capa lisa dependerá de la uniformidad del volumen de mezcla que reciba. Debido a la dificultad de ajustar la cantidad de mezcla que necesita la pavimentadora cuando la tolva está sobrecargada o infracargada, es importante que el tamaño de la hilera de mezcla producida por el camión de descarga inferior sea lo más uniforme posible. Mantener constante el tamaño de la hilera es más fácil que corregir el problema de que haya poca o demasiada mezcla en la tolva de la pavimentadora.

Un método para controlar mejor la cantidad de material en la tolva de la pavimentadora consiste en

formar una hilera un poco más pequeña de lo que necesita la pavimentadora. Un camión de descarga inferior adicional se mantiene justo delante de la máquina de extendido, pasando por encima de la hilera colocada por el camión o camiones anteriores, para complementar la cantidad de mezcla en la hilera según sea necesario. Este tipo de operación resuelve el problema potencial del llenado insuficiente o excesivo de la tolva de la pavimentadora y acelera enormemente el proceso de pavimentación.

Camiones de descarga en vivo

Un camión de descarga en vivo emplea una cinta transportadora o un transportador de tablillas en la parte inferior de la plataforma del camión para descargar la mezcla sin necesidad de elevar la plataforma. Este tipo de camión suele depositar la mezcla directamente en la tolva de la pavimentadora, al igual que un camión de descarga final, pero también puede descargar la mezcla en la superficie del pavimento existente para que la recoja un elevador de hileras de la pavimentadora, al igual que un camión de descarga inferior. Además, el camión de fondo móvil transporta la MAC en una masa, lo que minimiza la segregación en comparación con los camiones de descarga final. Dado que la plataforma de este tipo de camión no está elevada, no existe ningún problema potencial de presión de la plataforma sobre la tolva de la pavimentadora. En la Figura 13-4 se muestra un camión de descarga en vivo típico.

Vehículo de transferencia de material

Un método adicional utilizado para entregar la mezcla a la pavimentadora es un vehículo de transferencia de material (MTV) (véase la Figura 13-5). Un MTV es básicamente un contenedor sobre ruedas que puede contener hasta 32.000 kg (35 toneladas) de mezcla, dependiendo del tamaño de la unidad.

FIGURA 13-4 Camión de descarga en vivo típico

La MAC se deposita en la tolva situada en la parte delantera del vehículo, que puede estar equipada con uno o varios sinfines de remezclado El propósito del sistema de sinfín es volver a mezclar las partículas

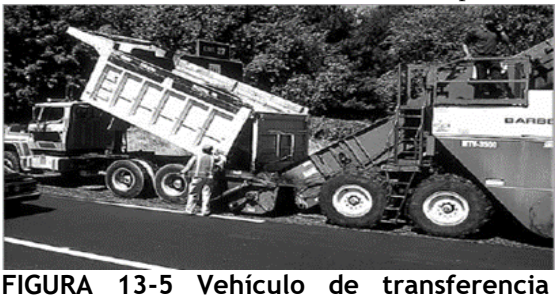


FIGURA 13-5 Vehículo de transferencia de material.

gruesas y finas del MAC y reducir cualquier segregación y variación de temperatura que pueda haberse producido en la mezcla como resultado del funcionamiento del silo de sobretensión o almacenamiento o de los procedimientos de carga del camión (véase el apartado 11). La mezcla se transporta desde la tolva a través de los sinfines y, a continuación, a un transportador, que entrega la mezcla a una extensión vertical o inserto en la tolva.

La MTV debe permitir que la pavimentadora funcione de forma casi continua, sin detenerse entre cargas de mezcla, siempre que se disponga de un suministro continuo de mezcla procedente de la planta de asfalto. Por lo tanto, el operador de la pavimentadora puede mantener constante la cabeza de material delante de la regla suministrando una cantidad continua de mezcla a la regla y obtener una capa más uniforme. El uso de un MTV también elimina los problemas de que el camión de transporte choque con la pavimentadora y de que el camionero mantenga los frenos del camión cuando es empujado por la pavimentadora. Sin embargo, como se ha señalado, la MTV es esencialmente un contenedor de sobrecarga móvil o en vivo; cuando se queda sin material, la pavimentadora debe detenerse, y no es posible una operación de pavimentado continue. Por lo tanto, es necesario mantener un flujo constante de camiones delante de la pavimentadora o del MTV si se quiere conseguir una operación de pavimentado continue. Si se produce un hueco, la MTV debe detenerse sin vaciarse completamente mientras se espera a los camiones, de forma que se retenga una cantidad mínima constante de mezcla en los sinfines para mezclarla con el nuevo material, posiblemente segregado, que se entregue desde el siguiente camión de acarreo. Además, la pavimentadora debe detenerse con la tolva llena hasta la mitad para que la cantidad de MAC delante de la regla de extendido se mantenga constante y se consiga la suavidad adecuada de la capa. De hecho, la cantidad de material delante de la regla pavimentadora es el factor más importante para obtener una capa de firme lisa (véase el apartado 16).La MTV se puede manejar directamente delante de la pavimentadora o a un lado.

Debido al peso de este equipo cuando está lleno de mezcla, es necesario determinar de antemano que el pavimento sobre el que se va a operar esta maquinaria puede soportar el peso cargado sin sobrecargarse y dañarse. Varios fabricantes de equipos han desarrollado MTV más pequeños y sencillos. Sin embargo, debido a la limitada capacidad de sobrecarga de la mayoría de estos dispositivos más pequeños, es más probable que la operación de extendido/pavimentación tenga que detenerse porque el MTV se quede sin material.

PROCEDIMIENTOS DE TRANSPORTE

Limpieza de la plataforma o lecho y Aplicación de desmoldeante

La plataforma de la caja del camión de transporte, ya sea de volteo final, de inferior o de fondo vivo, debe estar libre de todo material sucio antes de colocar la mezcla en ella. Deberá retirarse cualquier residuo que haya quedado en la plataforma debido al uso anterior del camión. La plataforma deberá estar razonablemente lisa y libre de hendiduras o depresiones (es decir, hundimientos, deformación o desgaste del material de la plataforma) importantes en las que puedan acumularse el agente desmoldante y el MAC.

Una vez que la plataforma esté limpia debe recubrirse con un agente re-limpiador para evitar que el MAC se pegue al lecho. Para este fin, se deben utilizar materiales no derivados del petróleo como el agua de cal o uno de los diversos productos comerciales. El desmoldante se pulverizará uniformemente sobre los laterales y el fondo de la plataforma y se utilizará la cantidad mínima necesaria para cubrir la mayor parte de la superficie de la plataforma sin que se escurra. El agente sobrante deberá escurrirse de la plataforma antes de cargar el camión con la nueva mezcla.

No debe utilizarse combustible Diesel como desmoldante para la plataforma del camión (véase la figura 13-6). Si se utiliza una cantidad excesiva de combustible Diesel y se acumula en las depresiones de la plataforma del camión, puede provocar cambios en las propiedades del material ligante con el que entra en contacto. Si una zona de la capa de MAC acabada contiene una cantidad excesiva de combustible Diesel, se producirá una zona blanda y tal vez un bache (véase la Figura 13-7). Además, el uso de combustible Diesel puede contribuir a problemas medioambientales, ya sea que el combustible se evapore o si se impregne en el suelo. Por lo tanto, aunque a menudo resulte cómodo y económico, el combustible Diesel no debe utilizarse como agente desmoldante en la plataforma de un camión de transporte.

FIGURA 13-6 El gasóleo es un agente de desprendimiento inaceptable.

Aislamiento

Si las condiciones ambientales lo justifican, deben aislarse los lados laterales y la parte inferior de la caja del camión. El aislamiento debe quedar apretada contra el cuerpo de la plataforma y no debe haber huecos entre el lateral del camión y el aislamiento por los que pueda entrar el viento. El material aislante debe estar protegido en su cara exterior con madera contrachapada o una cubierta similar. El aislamiento faltante o desgarrado debe reemplazarse.

Algunas mezclas de granulometría gruesa, como las capas de fricción, el asfalto de matriz pétrea y el Superpave de granulometría gruesa, tienden a enfriarse más rápidamente que las mezclas de granulometría fina, y las mezclas que contienen polímeros tienden a endurecerse más rápidamente a medida que se enfrían. Un camión bien aislado ayudará a minimizar cualquier pérdida.

FIGURA 13-7 Bache causado por el recubrimiento de gasóleo derramado

Uso de lonas

Cada camión de transporte debe estar equipado con una lona que se pueda utilizar según sea necesario para proteger el MAC en caso de inclemencias meteorológicas. La lona debe ser de un material repelente al agua, tener el peso y la resistencia suficientes para resistir los desgarros y estar en buenas condiciones, sin agujeros ni roturas. Y lo que es más

importante, la lona debe ser lo suficientemente grande como para cubrir la parte superior de la carga y extenderse hacia abajo sobre los laterales y el portón trasero del camión al menos 0,3 m (1 pie) alrededor de la caja del camión para garantizar que la mezcla esté protegida adecuadamente del viento y la lluvia. La lona también debe tener suficientes puntos de amarre para que esté bien sujeta y no se mueva con el viento durante el transporte de la mezcla de la planta a la pavimentadora.

Algunos camiones están equipados con lonas que van de la parte delantera a la parte trasera del camión en un carril encima de los laterales del camión. El riel mantiene la lona estirada a través de la parte superior de la carga de mezcla y cubre la mezcla sin que la lona tenga que extenderse sobre los lados de la plataforma del camión. Mientras la lona esté apretada, esta disposición puede proporcionar una cobertura adecuada para la mezcla. Por razones de seguridad, es deseable usar lonas que puedan extenderse por medios mecánicos a lo largo de la longitud del lecho (plataforma de carga) del camión sin que el conductor tenga que subir por los lados del vehículo.

Una lona que no cubra completamente la carga durante el transporte puede ser peor que no tener ninguna lona sobre la carga. La investigación ha demostrado que a menos que la lona se extienda sobre los lados del camión, el flujo de aire bajo la lona aumentará la tasa de enfriamiento de la mezcla. Además, el agua que caiga sobre la lona cuando llueva se escurrirá hacia la caja del camión en lugar de caer por el lateral del vehículo. De hecho, incluso cuando la lona cubre la plataforma, si hay agua en la lona cuando el camión está listo para descargar la mezcla en la tolva de la pavimentadora, el agua se debe quitar primero levantando la plataforma del camión y dejando que el agua se escurra antes de que el camión retroceda a la tolva. Esta operación de eliminación del agua no debe realizarse en el pavimento delante de la máquina de depósito.

Las lonas no suelen ser necesarias en climas cálidos y para distancias de transporte relativamente cortas entre la planta y la pavimentadora. Sin embargo, si se utiliza una lona, debe retirarse de la parte superior de la plataforma antes de descargar el camión en la máquina de extendido. Esto permite inspeccionar visualmente la mezcla en busca de material defectuoso, como áridos sin recubrir o un contenido excesivo de asfalto, antes de descargarla en la pavimentadora.

Encostramiento de la mezcla

No existe un límite establecido para la distancia que puede transportarse una carga de MAC. Muchas variables afectan a la distancia máxima de transporte, pero los factores clave son la trabajabilidad de la mezcla mientras pasa por la pavimentadora y la capacidad de compactar la mezcla una vez que ha sido colocada por la pavimentadora. Ambos factores dependen en gran medida de la temperatura de la mezcla.

La MAC en masa, ya sea cuando la mezcla está confinada en la caja de un camión, mantendrá una temperatura razonable durante 2 o 3 horas. La velocidad de enfriamiento de la mezcla depende de variables como su temperatura en el momento de la producción, la temperatura del aire ambiente y la eficacia del aislamiento utilizado en los laterales y el fondo del camión. Cuando se transporta largas distancias sin cubrirlo con una lona, la MAC se enfría y desarrolla una costra en la parte superior. La costra sirve como capa aislante para el resto de la mezcla en la plataforma del camión y reduce la velocidad de enfriamiento del resto del material. Por lo tanto, dentro de unos límites, la formación de una costra puede ser beneficiosa. Sin embargo, la costra debe deshacerse por completo antes de llegar a la extendedora, o se producirán desgarros y tirones en la superficie de la capa acabada.

Si la carga de mezcla se cubre adecuadamente con una lona, se reducirá al mínimo la formación de costras, ya que el viento tendrá un efecto significativamente menor sobre la velocidad de enfriamiento de la mezcla. El ligero espesor de la costra que se forme durante el transporte normalmente se romperá por completo cuando la mezcla se descargue del vehículo de transporte en la pavimentadora, sea transportado por los transportadores de tablillas de vuelta a los sinfines y pase por debajo de la regla de la pavimentadora. Siempre que los trozos de mezcla asfáltica no afecten a la calidad de la capa situada detrás de la pavimentadora, la costra que se forma encima de la mezcla durante el vaciado no será perjudicial para el rendimiento a largo plazo del aglomerado. Sin embargo, si se observan trozos de mezcla detrás de la regla, será necesario modificar la temperatura de producción de la mezcla, la cantidad de aislamiento de la plataforma del camión, la cobertura de la carga con la lona, el calendario de pavimentación (esperar a temperaturas ambiente más cálidas) o cualquier combinación de estos factores. También se ha demostrado que el uso de un MTV produce un cierto remezclado, que ayuda a descomponer los trozos que puedan existir.

Lluvia

Se requiere juicio cuando llueve en el sitio de pavimentación y la mezcla todavía está en los camiones esperando ser descargada. Una alternativa es dejar de pavimentar y devolver cualquier mezcla en los camiones a la planta para ser reciclada en una fecha posterior. Si la lluvia es relativamente ligera y parece probable que continúe durante algún tiempo, y si la superficie del pavimento ha sido asfaltada y no contiene agua encharcada, los camiones se pueden descargar lo más rápido posible y los rodillos se pueden colocar

directamente detrás de la pavimentadora para compactar la mezcla antes de que se enfríe por completo. Sin embargo, si la superficie del pavimento existente contiene charcos de agua, no se debe continuar con la colocación del MAC.

Algunas especificaciones permiten al contratista colocar la mezcla "en tránsito" en la carretera incluso durante una tormenta. En el caso de que el pavimento esté muy húmedo o haya agua estancada en la superficie, es mejor abstenerse de colocar la mezcla si la lluvia es intensa. Con el advenimiento del reciclado de pavimentos, el material no colocado puede reciclarse fácilmente más tarde. El único costo implicado es el de transportar la mezcla de vuelta a la planta y reprocesarla en la misma. Cualquier mezcla que se coloque durante la lluvia se enfriará muy rápidamente como resultado de la rápida transferencia de calor de la mezcla a la superficie húmeda del pavimento subyacente y el enfriamiento de la mezcla por la propia lluvia. Por lo tanto, es muy difícil obtener una densidad adecuada en la mezcla debido a su baja temperatura. La falta de compactación y, por tanto, el elevado contenido de vacíos en la mezcla, provocan un mal resultado del pavimento.

Si la lluvia parece ser de corta duración - una ducha pequeña - la mezcla se puede mantener en el camión de transporte en lugar de ser arrojada a la tolva de la pavimentadora. Luego debe colocarse después de que haya pasado la ducha y la superficie del pavimento esté libre de charcos. Una vez más, debido a la masa de mezcla en la cama del camión, la mezcla perderá temperatura lentamente si la carga está correctamente alquitranada: no puede entrar agua en la cama. Una vez que la lluvia se ha detenido y cualquier charco de agua se ha barrido de la superficie de la carretera, la mezcla se puede descargar de los camiones de espera en la pavimentadora y colocarse. Mientras los trozos de mezcla no aparezcan detrás de la regla y los rodillos puedan densificar adecuadamente la mezcla, se hace poco daño manteniendo la mezcla en los camiones de transporte durante incluso 2 o 3 horas, dependiendo de las condiciones ambientales.

Sacudidas de la pavimentadora

Cuando se utiliza un camión de descarga final o de fondo vivo para descargue la mezcla a la pavimentadora, el conductor del camión debe retroceder el camión hasta la máquina de colocación, pero detenerse justo antes de tocar la pavimentadora. Una vez que el camión se ha detenido y el conductor ha liberado los frenos del vehículo, el operador de la pavimentadora debe iniciar la máquina avanzando, recogiendo el camión detenido. La clave de este proceso es que la pavimentadora recoge el camión en lugar de que el camión retroceda y golpee la pavimentadora. El uso de este procedimiento reducirá la incidencia de marcas de regla y rugosidad en la capa. Dadas las especificaciones de suavidad que ahora se implementan en la mayoría de los estados, es imperativo que la operación de descarga de camiones no se sume al problema. Al saber por qué es importante no golpear la pavimentadora, la mayoría de los conductores de camiones usarán las técnicas de descarga correctas.

Descarga

Si se utiliza un camión de descarga final y si la mezcla que se descarga en la pavimentadora tiene tendencia a segregarse, la plataforma del camión debe elevarse una corta distancia para romper la carga hacia atrás y permitir que la mezcla en la plataforma se desplace y se deslice hacia atrás contra la compuerta trasera antes de que se abra. Esta práctica hará que cualquier material de aglomerado grueso segregado se incorpore de nuevo a la masa de mezcla en lugar de entregarse primero a la tolva de la pavimentadora. Una vez abierta la compuerta trasera, este procedimiento también permitirá que la mezcla se descargue del camión en una masa e inunde la tolva de la pavimentadora, reduciendo aún más la posibilidad de segregación detrás de la regla de extendido. Además, la elevación de la plataforma antes de que el camión retroceda hasta la pavimentadora reduce el tiempo necesario para descargar el camión y hace que el intercambio de camiones sea más eficaz.

El mismo procedimiento debe emplearse, si es posible, cuando se utiliza un camión de fondo vivo para transportar la mezcla. En algunos de estos camiones, puede ser posible arrancar la cinta o el transportador de listones durante unos segundos antes de que se abra la puerta de extremo en el camión. Hacerlo creará una masa de material que se puede entregar a la tolva, en lugar de permitir que cualquier partícula de agregado grueso que haya rodado hasta la puerta final salga primero a la tolva.

Para los camiones de volteo de fondo, las puertas en la parte inferior de la plataforma del camión deben abrirse de par en par para permitir que se descargue una masa de mezcla, en lugar de que solo parte de la mezcla gotee si las puertas están parcialmente abiertas. El tamaño de la hilera debe entonces ser controlado por la velocidad de avance del camión de acarreo. Si solo se necesita una pequeña cantidad de mezcla en la hilera, las compuertas se pueden encadenar para que no se abran completamente, limitando así la cantidad de MAC depositada en la calzada y creando la hilera de tamaño correcto. Todos estos procedimientos requieren coordinación entre el equipo de la pavimentadora y el conductor del camión.

RESUMEN

Al supervisar las operaciones de carga, acarreo y descarga de camiones, deben tenerse en cuenta los siguientes factores clave:

- La plataforma del camión debe estar libre de todo tipo de contaminantes. La plataforma debe estar ligera y uniformemente recubierta con un agente antiadherente no derivado del petróleo; no debe utilizarse combustible Diesel para este fin.
- Si se requiere aislamiento alrededor de la caja del camión, debe estar ajustado a los laterales y a la parte inferior del camión.
- El camión debe estar equipado con una lona en buen estado, sin roturas ni agujeros. La lona debe ser lo suficientemente grande como para cubrir la plataforma y envolver sus laterales y extremos. La lona debe tener suficientes sujeciones para que se pueda atar completamente y no ondee con el viento. Si se utilizan raíles laterales para sujetar la lona, ésta debe quedar bien tensada sobre la carga de mezcla.
- Los camiones de descarga final y de descarga viva deben detenerse cerca de la pavimentadora y permitir que la máquina recoja el camión en movimiento, en lugar de chocar con la pavimentadora detenida.
- La plataforma de un camión de descarga final debe elevarse una corta distancia y permitir que la mezcla del camión se rompa y se deslice contra la compuer-

-ta trasera antes de que ésta se abra para descargar la mezcla en la tolva de la pavimentadora. Si es posible, la cinta transportadora o el transportador de tablillas de un camión de descarga

- viva debe ponerse en marcha unos segundos antes de que se abra la compuerta final, para descargar una masa de mezcla asfáltica en la tolva en lugar de sólo un goteo de partículas de árido grueso.
- La carga transportada en un camión de descarga inferior debe depositarse uniformemente en la calzada delante de la extendedora, de modo que la cantidad de mezcla recogida por el elevador de hileras permita al operador de la pavimentadora mantener una cabeza uniforme de material delante de la regla de extendido. Alternativamente, la hilera debe construirse a propósito ligeramente corta de mezcla y un camión debe mantenerse delante de la pavimentadora, actuando como un depósito móvil para proporcionar cualquier mezcla adicional que necesite la pavimentadora.
- No debe permitirse que los camiones de volteo final entren en contacto con la tolva de la pavimentadora o transfieran peso a ella.

14 Preparación de la superficie

El funcionamiento de la MAC bajo tráfico está directamente relacionado con el estado de la superficie sobre la que se colocan las capas del pavimento. En el caso de un pavimento asfáltico en toda su profundidad, si el estado del suelo de la subrasante es deficiente (especialmente si está húmedo y presenta surcos bajo los camiones de transporte), la vida útil de la calzada puede reducirse considerablemente. En el caso de capas de MAC colocadas sobre una capa de base granular nueva no tratada, ese material de base debe ser estable, la superficie debe estar seca y la base no debe estar deformada por los camiones que transportan la mezcla hasta la extendedora. En el caso de que la mezcla se coloque sobre capas de asfalto existentes, la superficie deberá estar bien preparada - baches rellenos, grietas selladas y la superficie limpia. También debe utilizarse una capa de adherencia para asegurar la unión entre la superficie del pavimento existente y la nueva capa de asfalto.

PREPARACIÓN DE LA BASE PARA PAVIMENTOS MAC

Suelo de subgrado

Si el pavimento de asfalto se va a colocar directamente sobre el suelo de subgrado, ese material de subgrado debe cumplir con todos los requisitos aplicables de contenido de humedad, densidad, soporte estructural y suavidad. Después de que se haya determinado que el suelo de subgrado está listo para la pavimentación y antes de que se permita que comience la pavimentación, se debe verificar la subgrado para garantizar que pueda soportar el peso del tráfico de acarreo. Lo subgrado debe proporcionar una base firme antes de que comience el pavimento de asfalto. Si se produce una distorsión del suelo de subgrado durante la operación de pavimentación, la colocación de la mezcla debe detenerse hasta que se pueda corregir la condición del suelo.

Por lo general, no es necesario aplicar una capa de imprimación de emulsión asfáltica o asfalto recortado sobre el suelo de subgrado. Esto es especialmente cierto cuando el suelo es arcilloso limoso o arcilloso porque el material de la capa de imprimación no puede ser absorbido por el material del subgrado. El uso de una capa de imprimación en suelos arenosos también es cuestionable. Si el material arenoso se desplaza excesivamente bajo las ruedas de los camiones de transporte, debería estabilizarse con algún tipo de material ligante antes de pavimentar para conseguir las propiedades de carga requeridas. En tales casos, la aplicación de una capa principal generalmente no será suficiente para mantener el suelo arenoso en su lugar durante las operaciones de pavimentación. No se debe usar una capa principal como sustituto de la preparación adecuada del suelo de subgrado.

Capa de base granular

Si la capa de asfalto se va a construir directamente sobre una capa base granular nueva o existente sin tratar, ese material base debe cumplir todos los requisitos de contenido de humedad, densidad, resistencia estructural y suavidad. Sin embargo, la prueba de rodadura se debe hacer encima del material de base granular, y se debe tener en cuenta la cantidad de deflexión de la base y la cantidad de hendidura de las ruedas del camión en el material de curso de base granular. Si el material base es estable y seco y no se desvía y se sangra significativamente debajo de las ruedas de un camión de eje en tándem cargado, se debe permitir que comience la colocación de la capa principal o la nueva mezcla de asfalto. Si la condición del material granular no es satisfactoria, el curso base debe ser reelaborado o estabilizado hasta que esté en las condiciones adecuadas para el recubrimiento.

La capa de imprimación actúa como una capa impermeabilizante temporal que protege la capa base y evita que absorba un exceso de humedad durante la lluvia antes de la pavimentación. También permite que la capa base se utilice para tráfico ligero, aglutina el polvo que pueda haber en la superficie de la capa base granular, favorece la unión entre el material de la capa base y el nuevo recubrimiento de MAC, y evita el deslizamiento de las capas delgadas de pavimento superpuestas. Sin embargo, el propósito de una capa de imprimación es proteger los materiales subyacentes del tiempo húmedo. Si los materiales subyacentes pueden ser cubiertos antes de la lluvia, entonces no es necesaria una capa de imprimación. Cuando se utiliza una capa de imprimación, ésta debe aplicarse a la capa base con un distribuidor de presión al menos 48 horas antes de que comience la pavimentación. Típicamente, se utiliza un asfalto recortado (MC-30 o MC-70) como material de capa de imprimación, si está disponible. También se ha

aplicado con éxito una emulsión de asfalto invertido (emulsión que contiene cantidades limitadas de material de corte). La tasa de aplicación debe variar con la apertura (porosidad) del material de la capa base. Las dosis de aplicación típicas oscilan entre 0,65 l/m2 (0,15 gal/yd2) o menos para una superficie muy compacta y 1,8 l/m2 (0,40 gal/yd2) para una superficie abierta. No se debe aplicar más material de imprimación del que pueda ser absorbido completamente por la capa de base granular en 24 horas. Si la capa de imprimación no se absorbe por completo, el exceso debe eliminarse con arena.

PREPARACIÓN DE SUPERFICIES EXISTENTES PARA RECUBRIMIENTOS DE MAC

MAC sobre MAC

El grado de preparación necesario para un pavimento de asfalto existente depende del estado de dicha superficie. Como mínimo, deben eliminarse y sustituirse las zonas deterioradas; los baches deben parchearse adecuadamente; las grietas deben limpiarse y sellarse; y las roderas deben rellenarse o, preferiblemente, eliminarse mediante fresado en frío.

Sustitución y reparación del pavimento

En general, es desaconsejable intentar puentear las zonas fallidas con material de recubrimiento nuevo, a menos que se vaya a construir un recubrimiento muy grueso. Se debe llevar a cabo la retirada y sustitución de todas las áreas de pavimento existentes en las que se haya producido un deterioro grave relacionado con la carga. Los materiales de MAC y de base granular que hayan fallado deberán excavarse o fresarse en frío y, a continuación, reciclarse o desecharse. La distorsión de la subrasante/subgrado debe repararse mediante rebaje y recolocación con material de relleno adecuado. En caso necesario, deberá instalarse un drenaje subsuperficial adecuado. La capa de base granular nueva, las capas estabilizadas de la capa de base, o la mezcla de MAC se deben colocar para traer la fuerza de la estructura del pavimento en cada área fallada al mismo nivel que las capas buenas circundantes del pavimento. Si se utiliza MAC para parchear un área grande, se debe colocar con una pavimentadora y compactar con uno o más rodillos grandes (ver Figura 14-1).

FIGURA 14-1 Parches colocados con máquina pavimentadora.

Las zonas con fallos localizados deben parchearse adecuadamente. Cada una de ellas debe ser recortada hasta conseguir un pavimento sano y escuadrado, con los lados lo más verticales posible, el material suelto y el agua del agujero eliminados, una capa de adherencia aplicada a los lados y al fondo del agujero, la mezcla colocada en el agujero, y el nuevo material adecuadamente compactado, preferiblemente con un rodillo (ver Figuras 14-2 y 14-3). Si el bache tiene una profundidad superior a 100 mm (4 pulgadas), la mezcla debe colocarse en más de una capa y cada capa debe compactarse apropiadamente.

Relleno de grietas

Las secciones de pavimento muy agrietadas, especialmente las que presentan un patrón de agrietamiento (por ejemplo, mapa o cocodrilo), deben parchearse o sustituirse. Los beneficios de rellenar otras grietas en la superficie existente dependen, en parte, de la anchura de las grietas. Si las grietas son estrechas [menos de 10 mm (3⁄8 pulg.) de anchura, es dudoso que el material de sellado de grietas entre realmente en la grieta en lugar de acumularse en la superficie del pavimento. Tales grietas pueden ensancharse, si se desea, con una fresadora mecánica antes de intentar el sellado. Si las grietas son más anchas, deben ser sopladas con aire y limpiadas de residuos. El material de sellado de grietas debe introducirse cuando las grietas estén limpias y secas. El nivel del material de relleno de grietas debe ser ligeramente inferior al de la superficie del pavimento circundante y no debe derramarse sobre la parte superior de la grieta, donde podría crear una protuberancia en la nueva capa de pavimento durante el proceso de rodadura (véase la Figura 14-4).

Dependiendo de la causa del agrietamiento, la cantidad de grietas reflectantes que se producen en un recubrimiento puede reducirse a veces mediante el uso de un tratamiento superficial (capa de sellado) en el pavimento existente. Si la estructura del pavimento contiene un gran número de grietas, debe considerarse la posibilidad de aplicar un tratamiento superficial en lugar de rellenar grietas individuales.

FIGURA 14-2 Retirada del pavimento existente antes del parcheado.

FIGURA 14-3 Compactación del parche

Las grietas deben limpiarse, si es posible, soplándolas con aire. El tratamiento superficial debe aplicarse cuando la superficie del pavimento esté limpia y seca y debe consistir en una única aplicación de material ligante asfáltico (cemento asfáltico, asfalto recortado o emulsión asfáltica) y árido de cobertura. Alternativamente, se puede usar un sello de suspensión que consiste en una emulsión de asfalto, una compuerta de agarre fina y agua.

FIGURA 14-4 Protuberancia causada por el uso de un sellador de grietas excesivo.

Capas de nivelación

La práctica común en el pasado ha sido colocar una capa de nivelación en la superficie del pavimento existente para mejorar la manejabilidad de la estructura del pavimento. Esta capa de nivelación, a veces denominada capa de cuña y nivel o capa de rayado, está diseñada para rellenar los puntos bajos de la superficie del pavimento. Esta acción de nivelación se lleva a cabo utilizando la regla flotante de la pavimentadora, colocando más MAC en los puntos bajos que en los puntos altos de la superficie del pavimento existente. Sin embargo, las zonas con mezcla más gruesa suelen compactarse más que las zonas con mezcla más fina. Este problema, denominado compactación diferencial, requiere que se construyan varias capas sobre una superficie de pavimento que está muy deformada antes de que se pueda obtener una superficie lisa. Cuando la mezcla pasa por debajo de la regla de extendido, está suelta. La compactación por los rodillos reduce el espesor de la capa recién colocada. La regla general es que las mezclas convencionales se compactan aproximadamente 6 mm por 25 mm (1⁄4 pulg. por 1 pulg.) de espesor compactado. Así, para conseguir una capa compactada de 25 mm (1 pulg.) de espesor, la extendedora tendría que colocar unos 31 mm (1 $^{1}/_{4}$) de mezcla. Del mismo modo, aproximadamente 95 mm (3 $^{3}/_{4}$ pulg.) de mezcla tendrían que pasar por debajo de la regla de la extendedora para construir una capa con un espesor compactado de 75 mm (3 pulg.).

Cuando se coloca un curso de nivelación, el MAC colocado en las áreas bajas (en los caminos/trayectoria de ruedas si el pavimento está surcado o lleno de baches) será más grueso que la mezcla colocada sobre los puntos altos en la superficie (entre las carreteras). La mezcla más gruesa se compactará más debajo de los rodillos, particularmente si se usa un rodillo de neumático, que la mezcla que es más delgada. Por lo tanto, todavía existirán puntos bajos en los caminos de ruedas donde la mezcla se ha compactado en un grado diferente (y por lo tanto un contenido de vacío de aire diferente) que la mezcla entre los caminos de ruedas. Debido al problema de la compactación diferencial, generalmente se necesitan múltiples capas de mezcla para eliminar completamente la rugosidad en la superficie del pavimento existente. Una regla general es que una capa después de la compactación eliminará aproximadamente el 80 por ciento de un punto bajo. Dos capas, cada una compactada por separado, eliminarán aproximadamente el 95 por ciento de un punto bajo.

Fresado

El fresado, también llamado cepillado en frío, se puede utilizar para eliminar los puntos altos en la superficie existente en lugar de colocar un curso de nivelación (relleno en los puntos bajos). El fresado se puede realizar en cualquier ancho necesario, desde 150 mm (6 pulgadas) hasta más de 4 m (13 pies). La figura 14-5 ilustra una fresadora típica. Si está equipada con controles automáticos de pendiente y pendiente similares a los utilizados en una pavimentadora de asfalto, la fresadora es capaz de producir una superficie nivelada en una sola pasada sobre la superficie existente. El RAP producido vuelta a la planta de asfalto para su futuro reciclaje. En adición, si la superficie fresada se limpia adecuadamente, su textura puede mejorar la unión entre las capas nuevas y viejas y puede reducir la posibilidad de deslizamiento de la superposición sobre la superficie existente.

Una superficie fresada suele estar muy polvorienta y sucia. Una vez que el pavimento se ha secado, normalmente es necesario barrer varias veces con una escoba mecánica para eliminar toda la arenilla residual de la superficie fresada. En algunos casos, puede ser necesario humedecer la superficie fresada antes de barrer o soplar con aire o enjuagar la superficie fresada con agua para eliminar completamente el polvo y el material muy fino. El polvo y la suciedad que queden en la superficie fresada afectarán en gran medida a la adherencia entre esa capa y el nuevo recubrimiento asfáltico. Debido al aumento de la superficie del pavimento fresado (por las ranuras dejadas por los dientes de corte de la fresadora), puede ser necesaria una cantidad adicional de material de la capa de adherencia para asegurar una unión adecuada entre las capas

FIGURA 14-5 Fresadora típica.

antigua y nueva (ver Figura 14-6). La cantidad incrementada depende del tipo, número, condición y espaciamiento de los dientes en el mandril de corte de la fresadora, pero típicamente está en el rango de 20 a 30 por ciento más que para una superficie no fresada.

MAC sobre concreto de cemento Portland

Cuando MAC se coloca sobre un pavimento de hormigón de cemento portland (PCC), la superficie de PCC también debe prepararse adecuadamente. Cualquier área severamente deteriorada en las losas de concreto debe cortarse, quitarse y reemplazarse con PCC o MAC utilizando técnicas de reparación de losa de profundidad completa. El trabajo correctivo también debe completarse en el material subyacente de la subbase o de la subrasante, si es necesario. Cualquier área severamente desportillada en las juntas debe ser reparada utilizando métodos de reemplazo parcial de losas. El PCC debe usarse para reparaciones de profundidad parcial. Las losas oscilantes deben estabilizarse. Dependiendo de la condición del pavimento PCC, se pueden utilizar procedimientos como grietas y asientos, roturas y asientos, o frotamiento del pavimento existente antes de colocar la superposición, particularmente si las losas se balancean bajo la carga del tráfico. También se puede considerar el uso de una capa de alivio de grietas.

Para las juntas cv que están mal selladas, se debe quitar el material de sellado viejo y limpiar las juntas. Cuando estén secas, las juntas deben volver a sellarse con material adecuado para sellar las juntas. Se debe tener cuidado de no llenar demasiado las juntas, especialmente en climas fríos cuando están abiertas de par en par. En todos los casos, al igual que con el sellador de grietas, el nivel final del material de sellado de juntas debe estar por debajo de la parte superior de la superficie del pavimento circundante. Una vez que se haya completado el parcheo y el resellado, la superficie del pavimento de PCC debe limpiarse completamente con escobas mecánicas y soplado de aire o lavado con agua, o ambos, cuando sea necesario

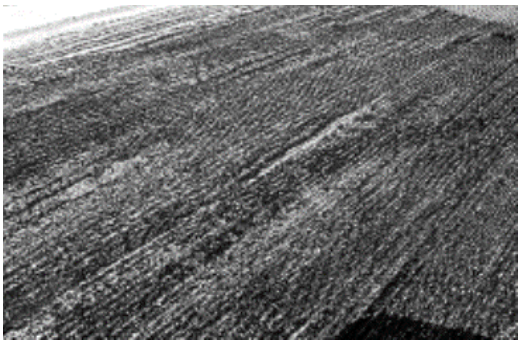


FIGURA 14-6 Capa de adherencia sobre la superficie fresada.

Capa adherente

El propósito de una capa de adherencia es asegurar una unión entre la superficie del pavimento existente y la nueva capa de asfalto. La capa adherente no debe usarse en lugar de limpiar la superficie existente - eliminando el polvo y la suciedad acumulados mediante escobas mecánicas o enjuagando con aire o agua. Si no se forma una buena unión entre la superficie existente y la nueva superposición, puede producirse un deslizamiento. El nuevo recubrimiento puede ser empujado en una dirección longitudinal por el tráfico, particularmente en lugares donde el tráfico acelera o donde se aplican los frenos del vehículo. Por lo tanto, la superficie del pavimento debe estar limpia antes de aplicar la capa adherente.

El material de la capa adherente – el cual es normalmente de emulsión asfáltica, pero también puede ser cemento asfáltico o asfalto recortado, debe aplicarse mediante un distribuidor de presión, como se muestra en la Figura 14-7. Todas las boquillas del distribuidor deben estar completamente abiertas y en funcionamiento y deben girarse en el mismo ángulo que la barra de pulverización, aproximadamente 30°. Además, la barra de pulverización debe estar a la altura adecuada sobre la superficie del pavimento para proporcionar una vuelta doble o triple del material asfáltico líquido. El resultado será la cantidad adecuada de superposición entre las boquillas y una aplicación uniforme de la capa adherente a la superficie de la carretera.

FIGURA 14-7 Distribuidor aplicando la capa de adherente.

El material de la capa de adherente debe calentarse a la temperatura adecuada para que sea lo suficientemente fluido como para ser rociado uniformemente desde las boquillas en lugar de salir en tiras.

Tasa de aplicación frente a tasa residual

La uniformidad de la aplicación y una tasa de aplicación adecuada son clave para lograr una capa de adherencia exitosa. La Figura 14-8 ilustra una aplicación de capa adherente que es desigual como resultado de una operación incorrecta del equipo, con demasiada capa adherente en algunas áreas y no suficiente en otras. Si se rocía la cantidad correcta de capa adhesiva sobre la superficie, parte de la superficie existente aún será visible a través de la capa adhesiva; No se cubrirá toda la superficie de pavimento existente. El uso de una capa de adherencia de emulsión asfáltica diluida (emulsión asfáltica de fraguado lento diluida 1h1 con agua) dará como resultado una cobertura completa y una película asfáltica residual muy delgada en la superficie del pavimento. La aplicación adecuada de la capa de adherencia dejará un contenido residual de cemento asfáltico de aproximadamente 0,18 a 0,27 l/m2 (0,04 a 0,06 gal/yd2) en la carretera. La cantidad de capa de adherencia residual necesaria dependerá de la condición de la superficie del pavimento. Una superficie de textura abierta requiere más capa de adherencia que una superficie apretada o densa, y una superficie seca y envejecida requiere más capa adhesiva que una superficie que está "grasa" o enrojecida.

Además, es posible que se necesite más capa de adherencia en una superficie fresada debido al aumento del área de superficie, como se discutió anteriormente; Es posible que se necesite una tasa residual de hasta 0,36 l/m2 (0,08 gal/yd2) de cemento asfáltico para garantizar una unión adecuada.

FIGURA 14-8 Distribuidor mal ajustado.

Es esencial diferenciar entre la tasa de capa adherente residual (la cantidad de cemento asfáltico que queda en la superficie del pavimento después de que el agua se ha evaporado) y la tasa de aplicación (la cantidad de emulsión rociada desde el distribuidor). La mayoría de las emulsiones asfálticas contienen entre un 60 y un 65 por ciento de cemento asfáltico residual y entre un 35 y un 40 por ciento de agua, además de una pequeña cantidad de agente emulsionante. Para facilitar el cálculo, se puede suponer que una emulsión asfáltica es aproximadamente dos tercios de cemento asfáltico y un tercio de agua. La cantidad de cemento asfáltico que queda en la superficie del pavimento después de que el agua se ha evaporado de la emulsión es el factor más importante para obtener una unión entre la superficie del pavimento existente y la nueva superposición. Para determinar la tasa de aplicación del material de la capa de adherencia, comience con la cantidad de cemento asfáltico residual requerido en la superficie del pavimento y trabaje hacia atrás.

A modo de ejemplo, supongamos que la superficie actual del pavimento es relativamente estrecha y densa. Se determina que la cantidad residual de cemento asfáltico en la superficie del pavimento debe ser de 0,18 l/m2 (0,04 gal/yd2). Si se utiliza una emulsión asfáltica SS-1 sin diluir para la capa de adherencia, la tasa de aplicación de ese material debe ser de aproximadamente 0,27 l/m2 (0,06 gal/yd2), calculada como (0,18) ÷ (2⁄3) = 0,27 l/m2 [(0,04) ÷ (2⁄3) = 0,06 gal/yd2]. Si la emulsión asfáltica SS-1 se ha diluido con partes iguales de agua, la tasa de aplicación necesaria para obtener la misma cantidad de asfalto residual en la superficie del pavimento será diferente. Usando una tasa de dilución 1:1, la dosis de aplicación para una cantidad residual de 0.18 l/m2 (0.04 gal/yd2) será de 0.54 l/m2 (0.12 gal/yd2). Por lo tanto, con el uso de una emulsión diluida 1h1, se debe aplicar el doble de emulsión a la superficie del pavimento desde el distribuidor para tener la misma cantidad de asfalto residual cuando toda el agua se ha evaporado.

Si la cantidad de agua en una emulsión asfáltica no se tiene en cuenta al determinar la dosis de aplicación del distribuidor, es posible que no se logre el grado correcto de adherencia. Muy poca capa de adherencia no proporcionará suficiente unión entre las capas de pavimento viejas y nuevas. Por otro lado, demasiada capa de adherencia puede contribuir al deslizamiento de la capa sobre la superficie del pavimento existente y al sangrado del material de la capa de adherencia a través de una capa delgada.

Si se usa cemento asfáltico en lugar de una emulsión asfáltica como material de recubrimiento de adherencia, la cantidad residual de asfalto en la superficie del pavimento debe ser la misma que la cantidad aplicada. Por lo tanto, si se desea 0,18 l/m2 (0,04 gal/yd2) de material aglutinante residual, la velocidad de aplicación del distribuidor también debe ser de 0,18 l/m2 (0,04 gal/yd2).

Tiempo de ruptura y fraguado

Cuando se aplica una emulsión asfáltica como capa adherente, es de color marrón porque contiene cemento asfáltico y agua. Después de un período muy corto de tiempo, la emulsión se romperá, cambiará de color de marrón a negro, y el agua comenzará a evaporarse. La tasa de evasión dependerá del tipo y grado de la emulsión utilizada, la tasa de aplicación, la temperatura de la superficie del pavimento existente y las condiciones ambientales. Una vez que se ha ido toda el agua, se dice que la emulsión se ha "endurecido". La velocidad de fraguado depende de las mismas condiciones que controlan la velocidad de rotura de la emulsión. En la mayoría de las circunstancias, una emulsión se endurecerá en 1 a 2 horas.

Existe cierta controversia sobre si la MAC puede colocarse sobre una emulsión asfáltica antes de que la emulsión haya fraguado -mientras aún se retiene algo de agua en la superficie del pavimento-. Existe aún más controversia sobre si la MAC puede colocarse encima de una emulsión asfáltica antes de que se haya roto, mientras el cemento asfáltico y el agua aún están combinados. En el pasado, se consideraba que la emulsión debía estar completamente fraguada antes de colocar la nueva mezcla sobre el material de la capa de adherencia. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que la nueva mezcla asfáltica puede colocarse sobre una capa de adherencia no fraguada, e incluso sobre una emulsión de adherencia no rota, sin que ello afecte negativamente al comportamiento del firme; la adherencia seguirá formándose. De hecho, en Europa, la capa de adherencia de emulsión se aplica a menudo a la superficie del pavimento por debajo de la pavimentadora, desde una barra de pulverización situada justo detrás de los neumáticos u orugas (también llamadas rastreadoras) de la pavimentadora y justo antes

de la capa de MAC delante de la regla de la pavimentadora. Con este punto de aplicación de la capa de adherencia, la emulsión estará intacta cuando se coloque la mezcla encima, pero la emulsión se romperá inmediatamente al entrar en contacto con la nueva MAC. El agua, 0,36 l/m2 (0,08 gal/yd2), normalmente se evaporará y escapará en forma de vapor a través de la mezcla caliente suelta. No hay agua suficiente para reducir significativamente la temperatura de la capa.

Si bien se cree que la emulsión asfáltica se puede pavimentar adecuadamente antes de que se fraguara por completo, e incluso antes de romperse, también es importante que el material de la capa de adherencia permanezca en la superficie del pavimento para crear la unión entre las capas. Si el material de la capa de adherencia no está fraguado y una cantidad significativa de tráfico de camiones de transporte pasa por encima del material no colocado, gran parte de la capa de adherencia puede ser recogida por los neumáticos del camión y rastreada por la carretera. Por lo tanto, se debe permitir que la capa de adherencia se asiente antes de que se permita que el tráfico de camiones de acarreo la atropelle, o se debe minimizar la cantidad de tráfico de camiones.

Si se utiliza cemento asfáltico como material de capa de adherencia, se enfriará a temperatura ambiente muy rápidamente. Además, debido a que no hay material portador (agua) para evaporar, el pavimento puede seguir inmediatamente a la aplicación de la capa de cemento asfáltico.

Si la capa de recubrimiento se va a construir bajo el tráfico, la capa adherente normalmente se coloca solo a una corta distancia frente a la pavimentadora, dentro del cierre del carril y lo suficientemente adelante como para que la tachuela se asiente correctamente antes de que la MAC se coloque encima de ella. El tráfico se mantiene fuera de la capa de tachuelas en todo momento. Si la carretera que se está pavimentando está cerrada al tráfico, la capa de adherencia se puede colocar hasta 24 horas antes de la operación de colocación. Si lo haces, te asegurarás de que la capa de tachuelas esté completamente fija antes de que la mezcla se coloque encima de ella. En circunstancias inusuales, si el tráfico debe pasar por encima de la capa de adherencia antes de que se coloque la capa de cobertura, se puede extender una ligera capa de arena sobre la capa adherente para evitar que el tráfico la recoja. La tasa de aplicación de la arena debe estar en el rango de 2.2 a 4.4 kg/m2 (4 a 8 lb/yd2), dependiendo de la tasa de aplicación del material de la capa de adherencia y la gradación de la arena. El exceso de arena debe eliminarse de la superficie del pavimento antes de colocar la capa para garantizar una unión adecuada entre la capa y la superficie existente.

Si los problemas del equipo (averías de la planta o de la pavimentadora) impiden que el material de la capa de adherencia que se ha aplicado desde el distribuidor se pavimente antes de que el tráfico deba usar la carretera, se sugiere que los límites de velocidad indicados en esa sección de la carretera se reduzcan significativamente hasta que se pueda llevar a cabo la operación de superposición. No es una buena práctica colocar la capa adherente un día, permitir que el tráfico pase por encima de la capa de tachuelas durante un período de tiempo y luego colocar la capa superpuesta en una fecha posterior. Dependiendo de la cantidad de cemento asfáltico residual en la superficie del pavimento y de las condiciones ambientales, el nivel de fricción disponible para el tráfico en la superficie del pavimento puede reducirse en gran medida por la presencia del material de la capa de adherencia. El exceso de capa adherente también se arrojará a los vehículos, creando un importante problema de relaciones públicas. Además de reducir los límites de velocidad indicados, puede ser aconsejable aplicar arena a la superficie adherida como se discutió anteriormente.

La aplicación de material de capa adherente es esencial cuando se construye una capa sobre una superficie de pavimento antigua existente, ya sea MAC, PCC o tratamiento de superficie. Sin embargo, a menudo no se necesita una capa de adherencia cuando se coloca una capa de mezcla nueva sobre otra capa de pavimento de asfalto que se ha colocado en unos pocos días, siempre y cuando la nueva capa subyacente no se haya ensuciado bajo el tráfico o por el polvo arrastrado por el viento. Si se utiliza una capa de adherencia en una capa de MAC recientemente colocada, el contenido de asfalto residual debe ser mínimo, en el rango de 0,09 l/m2 (0,02 gal/yd2), o la mitad de lo que se necesita para la mayoría de las superficies viejas y estrechas existentes. Por lo tanto, la tasa de aplicación de una emulsión SS-1 sin diluir debe ser solo de aproximadamente 0,14 l/m2 (0,03 gal/yd2). No es necesario material adicional de capa de adherencia ya que el material no será absorbido por la nueva superficie de pavimento subyacente.

RESUMEN

Se deben tener en cuenta los siguientes factores clave al monitorear las operaciones de preparación de superficies:

- Por lo general, no se necesita una capa de imprimación en suelos de subrasante. Existe una diferencia de opinión sobre los beneficios de usar una capa adherente en una capa de base granular, pero en muchos casos una capa adherente se puede eliminar sin un efecto perjudicial en el rendimiento de la estructura del pavimento.
- Antes de pavimentar una superficie existente, cualquier falla en la superficie debe eliminarse y reemplazarse o repararse mediante parches, a menos que se construya una capa muy gruesa.

- Si hay grietas en una superficie de pavimento de asfalto existente, generalmente se deben sellar individualmente o se debe aplicar algún tipo de tratamiento superficial a toda el área de la carretera. Las juntas en el pavimento de PCC que están mal selladas deben enrutarse y sellarse. Las losas de PCC oscilantes deben estabilizarse.
- Una superficie de asfalto rugosa e irregular debe nivelarse con mezcla asfáltica (usando un adoquín para colocar la mezcla) para rellenar los puntos bajos de la superficie o debe fresarse en frío con una fresadora para eliminar los puntos altos.
- Una vez que se hayan completado las reparaciones necesarias, la superficie del pavimento debe limpiarse de todo polvo, suciedad y otros desechos. Esto debe lograrse utilizando varias pasadas de una escoba mecánica. Si la escoba no elimina toda la suciedad acumulada, es posible que sea necesario enjuagar con aire o agua.
- La aplicación de una capa adherente debe lograrse antes de que se construya una capa de recubrimiento en una superficie de asfalto o PCC existente. El distribuidor utilizado debe revisarse para asegurarse de que todas las boquillas estén abiertas y colocadas en el ángulo correcto y que la barra rociadora esté a la altura adecuada sobre la superficie del pavimento.
- La tasa de aplicación de la capa adherente debe basarse en la cantidad residual deseada de cemento asfáltico en la superficie de la carretera, que debe estar entre 0,18 y 0,27 1/m2 (0,04 y 0,06 gal/yd2) para superficies normales.

Muy poca capa adherente no proporcionará la unión necesaria entre las capas viejas y nuevas. Por otro lado, demasiada capa adherente puede promover el deslizamiento de la nueva capa en el pavimento viejo o el sangrado del material de adherencia a través de una capa delgada.

- Por lo general, la MAC se puede colocar encima de una capa de emulsión antes de que se haya endurecido por completo, e incluso antes de que se haya roto, cambiando de color de marrón a negro.
- La tasa de aplicación también debe basarse en la cantidad real de cemento asfáltico en la emulsión, ya sea que la emulsión se diluya o no antes de aplicarse. Se debe aplicar una emulsión SS-1 sin diluir desde el distribuidor a una tasa de 0.27 l/m2 (0.06 gal/yd2) para obtener 0.18 l/m2 (0.04 gal/yd2) de asfalto residual en la superficie del pavimento.
- Los pavimentos fresados pueden necesitar una mayor cantidad de capa adherente residual. Sin embargo, la capa de adherencia no debe ser recogida y rastreada por los camiones de transporte.
- La capa adherente no debe dejarse expuesto al tráfico. Si es necesario hacerlo, se deben tomar las precauciones adecuadas, como reducir el límite de velocidad en la carretera y arenar la superficie.
- Normalmente no se necesita una capa adherente entre las capas de MAC nuevo. Si se utiliza, la cantidad de asfalto residual en la superficie de la carretera debe ser aproximadamente la mitad de lo apropiado para una superficie de pavimento vieja, estrecha y existente.

15 Colocación de la mezcla

El propósito principal de la pavimentadora es colocar la MAC con el ancho, grado, pendiente transversal y grosores deseados y producir una textura mate uniforme. La pavimentadora también debe ser capaz de colocar la MAC de una manera que resulte en una mejor manejabilidad y suavidad de la carretera.

Hay dos tipos de pavimentadoras, de oruga (Caterpillar) y de neumáticos de goma, que son básicamente iguales y realizan funciones similares en una operación de pavimentación. La pavimentadora de orugas, cuyas orugas pueden ser todas de acero, equipadas con almohadillas de goma o una oruga de goma sin fin, ofrece un alto grado de flotación y tracción cuando se viaja a través de estructuras débiles de pavimento subyacente al proporcionar un área mayor sobre la cual distribuir el peso de la pavimentadora. Por lo tanto, este tipo de adoquín se utiliza normalmente cuando se pavimenta sobre una base blanda o flexible. Una pavimentadora de neumáticos de caucho se usa generalmente cuando se coloca MAC sobre capas de capa base granular bien compactadas o sobre pavimentos MAC o PCC existentes. Además, si la pavimentadora se va a mover regularmente por sus propios medios entre los lugares de extendido, generalmente se utiliza una pavimentadora de neumáticos de caucho o una pavimentadora de “orugas” con una pista de goma sin fin, ya que la velocidad de desplazamiento de estos vehículos es mucho mayor que la de los otros tipos de pavimentadoras de orugas.

La pavimentadora consta de dos partes principales: la unidad tractora y la unidad de regla. La unidad tractora proporciona la fuerza motriz a la pavimentadora y empuja el camión de arrastre delante de la pavimentadora durante el proceso de descarga si la mezcla se suministra directamente desde el camión a la tolva de la pavimentadora (ver Sección 13). La unidad tractora también transfiere la mezcla asfáltica desde la tolva receptora en la parte delantera de la máquina a los sinfines en la parte posterior de la pavimentadora. La unidad de regla se fija a la unidad tractora en un solo punto a cada lado de la pavimentadora y "flota" en el MAC. La regla proporciona la textura y compactación iniciales al MAC a medida que sale de debajo de la unidad. La Figura 15-1 es un esquema que muestra las unidades de tractor y regla.

UNIDAD DEL TRACTOR

La cabeza tractora cumple todas las funciones necesarias para recibir la mezcla asfáltica directamente de los camiones de transporte o para recoger la mezcla de una hilera, transportarla a través de la máquina de vuelta a los sinfines y luego distribuirla a lo ancho de la regla. La unidad tractora, equipada con neumáticos de goma u orugas, es impulsada por su propia máquina y proporciona la energía de propulsión necesaria para mover la máquina hacia adelante, empujando el vehículo de arrastre delante de ella si es necesario. La unidad tractora, equipada con neumáticos de caucho u orugas, es impulsada por su propia máquina y proporciona la energía de propulsión necesaria para mover la máquina hacia adelante, empujando el vehículo de arrastre delante de él si es necesario. Tiene los siguientes componentes principales: los rodillos de empuje del camión y un sistema de alimentación de material que consta de una tolva receptora de mezcla, transportadores de listones, compuertas de flujo de material (generalmente) y un par de sinfines. La unidad tractora también proporciona la fuerza motriz para la regla tirando de ella detrás del tractor.

RODILLOS DE EMPUJE

Los rodillos de empuje, localizados en la parte delantera de la tolva de la pavimentadora, se utilizan para mantener el contacto con los neumáticos del camión de acarreo y para empujar ese camión por delante de la pavimentadora. Los rodillos deben estar limpios y girar libremente para permitir un desplazamiento suave hacia adelante de la pavimentadora. Si los rodillos de empuje no se limpian periódicamente y no giran libremente, los neumáticos del camión se deslizarán sobre los rodillos y aumentarán la carga sobre la pavimentadora. Además, si un rodillo gira libremente y el otro no, la pavimentadora puede ser más difícil de dirigir. Muchas pavimentadoras están equipadas con un enganche de camión que se encuentra debajo o incorporado a los rodillos de empuje en la parte delantera de la pavimentadora. El propósito del enganche es mantener el camión en contacto con la pavimentadora y, por lo tanto, evitar que el conductor del camión se aleje de la pavimentadora y vierta inadvertidamente la mezcla en el pavimento frente a la pavimentadora. El enganche, controlado por el operador de la pavimentadora, tiene brazos, con rodillos unidos, que se extienden hacia adelante. Los rodillos se retraen en la llanta del camión y contra el neumático mismo, evitando que el camión pierda contacto con la pavimentadora durante el proceso de descarga. Una vez que la caja del camión se ha vaciado de la mezcla

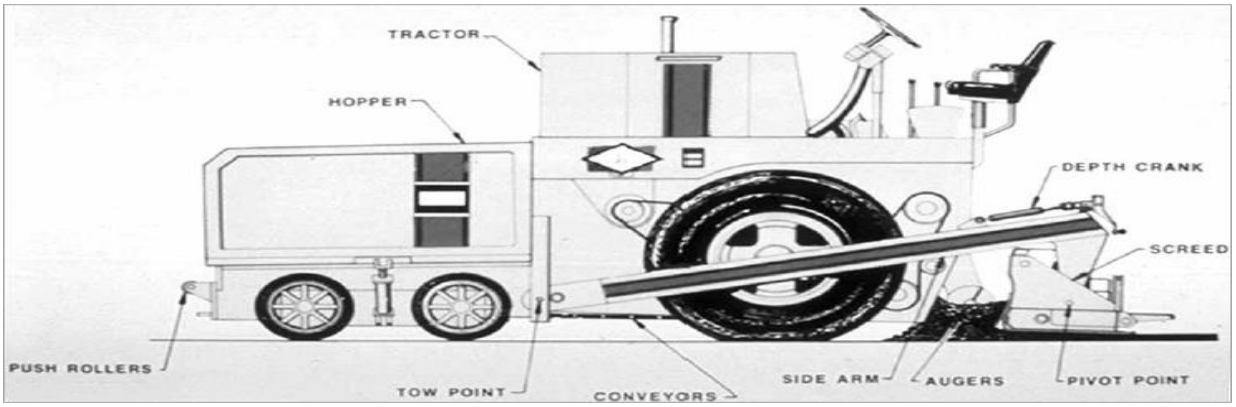


FIGURA 15-1 Esquema de una pavimentadora de MAC

se retira el enganche del camión y el camión puede separarse de la pavimentadora.

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE MATERIAL

El sistema de alimentación de material en la unidad tractora juega un papel muy importante en la producción de una alfombra consistente y de alta calidad detrás de la máquina de colocación. En esta sección se revisan los componentes del sistema de alimentación de material y su funcionamiento básico.

COMPONENTES DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE MATERIAL

Como se señaló, el sistema de alimentación de material generalmente consta de una tolva pavimentadora, transportadores de listones, compuertas de flujo de material y un par de sinfines (barrenas taladros también se llaman).

Tolva de pavimentación: La tolva de pavimentación, que se muestra en la Figura 5-2, se utiliza como área de almacenamiento temporal para la mezcla asfáltica entregada desde el vehículo de transporte, el elevador de hileras o el vehículo de transferencia de material (MTV). La capacidad de la tolva compensa las fluctuaciones de las demandas de material que se encuentran al extender sobre pendientes irregulares y, por lo tanto, ayuda a mantener una velocidad de extendido constante. Cuando la mezcla se entrega con un vehículo de transporte, la tolva debe ser lo suficientemente ancha para permitir que la carrocería del vehículo de transporte quepa dentro de ella. Además, especialmente para las extendedoras más pequeñas, la tolva debe ser lo suficientemente baja como para permitir que la plataforma del camión se eleve sin que la cama coloque peso en la parte delantera de la tolva.

La parte delantera de la tolva está diseñada para minimizar el derrame de mezcla fuera de la tolva durante el funcionamiento o mientras se descargan las alas de la tolva. Los protectores de desbordamiento o tapajuntas reducen aún más el derrame fuera de la tolva durante la elevación o descarga de las alas de la pavimentadora. El estado de estos protectores debe revisarse regularmente, ya que a menudo se dañan por las plataformas de los camiones de transporte cuando se descarga la MAC. Además, para ciertos tipos y tamaños de camiones de transporte, es posible que sea necesario cambiar la forma de los protectores para evitar el derrame de la mezcla sobre la superficie del pavimento existente.

Si se utiliza un elevador de hileras (consulte la Figura 15-3) para alimentar la mezcla a la pavimentadora, la tolva debe tener suficiente volumen para que la pavimentadora pueda almacenar temporalmente la MAC si la demanda de mezcla en la regla varía, como cuando se coloca una capa de nivelación. Además, dado que la cantidad de mezcla en la hilera puede variar, la tolva debe ser lo suficientemente grande como para contener cantidades fluctuantes de mezcla descargada sin desbordarse o permitir que la regla se quede sin material. Las aspas del transportador de listones del elevador de hileras deben colocarse en el nivel adecuado para recoger la mayor cantidad posible de la mezcla que se ha colocado en el pavimento existente. Esencialmente, no se debe dejar ninguna mezcla en la hilera, excepto quizás monte mínimo en los puntos bajos de la superficie del pavimento cuando se está colocando una capa de nivelación. Cualquier capa delgada de material restante se enfriará rápidamente y puede resultar en dificultades para compactar la MAC.

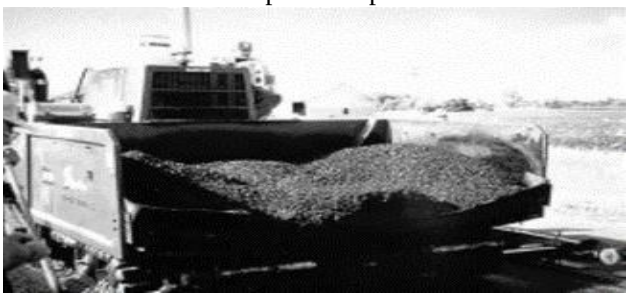


FIGURA 15-2 Tolva de pavimentación MAC cargada.

FIGURA 15-3 Elevador de hileras.

Además, pueden producirse rayas longitudinales en la estera detrás de la pavimentadora en el mismo lugar que los bordes exteriores de la hilera.

La cantidad de mezcla en la tolva de la pavimentadora siempre debe mantenerse a un nivel por encima de la parte superior de las compuertas de flujo o las aberturas del túnel en la parte posterior de la tolva. De este modo, el operador de la pavimentadora puede mantener los transportadores llenos y, por lo tanto, mantener una altura constante de MAC delante de la regla de la pavimentadora, proporcionando una estera lisa detrás de la regla. Esta práctica es particularmente importante entre camiones cargados de mezcla para reducir los problemas de segregación.

Como se muestra en la Figura 15-4, los lados, o alas, de la tolva son móviles. Cualquier mezcla que se deje reposar durante mucho tiempo en las esquinas de la tolva se enfriará y puede aparecer como trozos de material en la parte posterior de la regla cuando pase por la pavimentadora. Por lo tanto, la mezcla se mueve periódicamente desde los lados de la tolva hasta el centro de la tolva doblando las alas (lados) y depositando la mezcla en la parte superior del área de los transportadores.

Muchos operadores de pavimentadoras vuelcan (pliegan) las alas de la pavimentadora después de que cada camión cargado de mezcla se haya vaciado en la tolva. Esta no es una buena práctica y, en general, debe evitarse. Además, para evitar el derrame de la mezcla por la parte delantera de la tolva cuando las alas están plegadas, el operador a menudo reduce la cantidad de mezcla que queda en la tolva al continuar ejecutando los transportadores de listones para alimentar la mezcla

FIGURA 15-4 Pavimentadora MAC con las alas levantadas.

de regreso a los sinfines después de que el camión se haya alejado de la pavimentadora. Esta práctica puede resultar en que el transportador de listones funcione casi vacío y puede provocar un aumento de los problemas de estera si la mezcla segregada se deposita en los listones del transportador, ya sea desde las alas de la pavimentadora o desde el camión de transporte, y se transporta de regreso a los sinfines y la regla. Por lo tanto, no es una buena práctica volcar las alas de la pavimentadora después de que se haya entregado cada camión cargado de mezcla o depositar la mezcla retenida en las alas en la tolva de la pavimentadora vacía, porque cualquiera de los dos procedimientos puede disminuir significativamente la calidad y la suavidad de la capa terminada.

Para minimizar la segregación, el operador de la pavimentadora debe plegar las alas con la menor frecuencia posible, solo con la frecuencia suficiente para mantener el material lo suficientemente caliente para una colocación y compactación adecuadas. La frecuencia con la que se vierten las alas depende de la velocidad de entrega de la mezcla a la pavimentadora, la temperatura de la mezcla y las condiciones ambientales. Las alas deben vaciarse antes de que la mezcla que se acumula en las esquinas de la tolva se haya enfriado hasta el punto en que se formen trozos que no se puedan romper a medida que esa mezcla se mueve a través de la pavimentadora hacia los sinfines y debajo de la regla. En los días más fríos y ventosos, las alas de la tolva deben descargarse con más frecuencia que en los días más cálidos y tranquilos.

Cuando sea necesario volcar las alas, los lados de la tolva deben elevarse lentamente tan pronto como el camión de transporte se haya vaciado y se haya separado de la pavimentadora. Se debe mantener una velocidad constante de pavimentación hacia adelante de la máquina de colocación a medida que los lados de la tolva continúan subiendo. Las alas deben estar completamente elevadas antes de que la cantidad de mezcla que queda en la tolva sea menor que la parte superior de las compuertas de flujo o las aberturas en la parte posterior de la tolva. (Los transportadores de listones nunca deben ser visibles en el momento en que se izan las alas, o en cualquier otro momento durante la operación de pavimentación). La pavimentadora debe detenerse antes de que las aberturas del túnel o las compuertas de flujo sean visibles, y luego se deben bajar los lados de la tolva. Este procedimiento minimiza el problema de segregación que a menudo ocurre cuando se vacían los lados de la tolva, mientras se limpia la mezcla del enfriador de las esquinas de la tolva.

Como se discutió más adelante, mantener la tolva relativamente llena entre camiones cargados de mezcla mantiene una carga constante de mezcla en posición de suelo frente a la regla de la pavimentadora y también reduce cualquier segregación que pueda estar presente

en la mezcla. Además, las alas no deben ser "golpeadas" repetidamente mientras se vacían.

Para evitar que la MAC se acumule en las esquinas de la tolva de la pavimentadora y así evitar tener que volcar las alas de la tolva para eliminar el material frío, se puede colocar un filete en cada esquina de la tolva. Una pieza triangular de chapa de acero se puede atornillar a los lados de la tolva, llegando desde la esquina superior trasera hasta el piso de la tolva justo fuera de la abertura de la compuerta de flujo, y también hasta la esquina frontal inferior de la tolva. Este filete evita que la mezcla se lleve por las esquinas de la tolva y elimina la necesidad de vaciar las alas de la tolva. El filete se puede dimensionar y ubicar de manera que aún sea posible encajar completamente la plataforma de un camión volquete en la tolva de la pavimentadora y vaciar el camión sin que la plataforma del camión entre en contacto con la tolva.

También es posible simplemente no vaciar las alas de la pavimentadora durante el día de extendido. Si se permite que la MAC se acumule en cada ala, se enfriará y desarrollará un ángulo natural de reposo. Esta MAC frío evitará que la nueva mezcla de los camiones de transporte, el elevador de hileras o el MTV se acumule en las alas. Al final del día, el material frío se puede eliminar de cada área del ala levantando y sacudiendo los lados de la tolva. Los dos grandes trozos de mezcla pueden transportarse de vuelta a la planta de asfalto para su reciclaje. Aunque este método evita que la mezcla se acumule en las alas de la tolva después de la acumulación inicial, es una mejor práctica colocar un filete en cada ala para eliminar tanto la recolección como la necesidad de eliminación de MAC en el área del ala.

Transportadores de listones: En la parte inferior de la tolva de la pavimentadora suele haber un conjunto de transportadores de listones que consta de cadenas pesadas y barras de vuelo (consulte la Figura 15-5). Los transportadores de listones son un sistema continuo, en el que los listones se giran de nuevo hasta el fondo de la tolva debajo de la propia pavimentadora. Estos dispositivos se utilizan para transportar la mezcla asfáltica desde la tolva a través de los túneles en la pavimentadora y de regreso a los sinfines. El transportador de listones de un lado de la extendedora funciona independientemente del del otro lado. En la mayoría de las pavimentadoras modernas, el sistema de transportador funciona independientemente de la velocidad de la pavimentadora, y en algunas pavimentadoras, la velocidad de los transportadores también es independiente de la velocidad de los sinfines. Por lo tanto, la cantidad de mezcla que se transporta a través de la pavimentadora en un lado puede diferir de la que se entrega en el otro lado, y el operador de la pavimentadora puede alimentar más o menos material a ambos lados de la pavimentadora para pavimentar rampas, desvíos de buzones y conos.

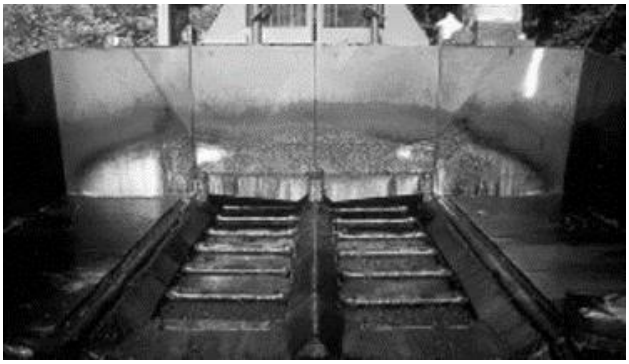


FIGURA 15-4 Pavimentadora HMA con las alas levantadas.

En algunas pavimentadoras, el sistema de transportador de listones ha sido reemplazado por un sistema de transportador de tornillo. El propósito de este último sistema es remezclar la MAC en la tolva de la extendedora y reducir la segregación detrás de la regla. Dos transportadores de tornillo paralelos, uno con paso a la izquierda y otro con paso a la derecha, recorren longitudinalmente la longitud de la extendedora, uno a cada lado de la máquina, tirando de la mezcla de la tolva de la extendedora y descargándola a los sinfines transversales situados delante de la regla. Los transportadores de tornillo están equipados con paletas mezcladoras para mezclar la mezcla de lado a lado a medida que la mueve el transportador. Sin embargo, para que este sistema funcione correctamente, debe haber suficiente mezcla retenida en la tolva de la pavimentadora entre las cargas de mezcla de los camiones, el nivel de mezcla restante en la tolva debe estar por encima del nivel de las compuertas de flujo o las aberturas del túnel en la parte posterior de la tolva, de modo que haya material para mezclar. Si los transportadores de tornillo son visibles entre camiones cargados de mezcla, este sistema no abordará adecuadamente el problema potencial de segregación.

Para llevar la mezcla más lejos a los sinfines cuando la mezcla es entregada por los transportadores de listones, algunos extendedores están equipados con una placa de piso extendida en el extremo trasero del sistema de transporte. Esta placa se utiliza para depositar la mezcla más cerca de los sinfines en lugar de dejar que caiga rápidamente a la superficie del pavimento subyacente cuando se desprende de los transportadores. Este sistema se utiliza para eliminar la segregación tradicional en la caja de engranajes del sinfín.

Compuertas de flujo: En la parte posterior de la tolva de la pavimentadora en la mayoría de las pavimentadoras hay un conjunto de compuertas de flujo. Estas compuertas, una sobre cada uno de los dos transportadores de listones, se utilizan para regular la cantidad de mezcla que puede ser entregada por cada transportador se utilizan para regular la cantidad de

mezcla que puede ser entregada por cada transportador al sinfín correspondiente en la pavimentadora.

Las compuertas de flujo se encuentran en extendedoras en las que la velocidad del sistema de transportador de listones y la del sinfín a cada lado de la máquina están entrelazadas, de modo que la velocidad del sinfín aumenta cuando se aumenta la del transportador de listones. Las puertas se pueden mover verticalmente, ya sea manual o mecánicamente (eléctricamente). Dependiendo de la configuración vertical de las compuertas, se permite la entrada de más o menos mezcla en cada túnel de la pavimentadora. La ubicación de las compuertas de flujo se muestra en las Figuras 15-6 y 15-7.

Las compuertas de flujo deben ajustarse para proporcionar una cabeza de material uniforme (a un nivel igual o justo por encima del centímetro del eje del sinfín) frente a la regla para cada ancho de estera particular, espesor de la alfombra y velocidad de pavimentación. Si la demanda de mezcla es diferente en cada lado de la máquina (diferente ancho de pavimento o espesor de la estera), la elevación de las compuertas de flujo debe diferir en cada lado de la tolva en consecuencia. En algunas pavimentadoras, se coloca un sensor detrás de las compuertas de flujo para monitorear la cantidad de mezcla que pasa al túnel y alertar al operador de una condición de flujo de material bajo o sin él.

Las compuertas de flujo no se utilizan con pavimentadoras en las que el transportador y el sinfín a cada lado de la máquina se accionan por separado. En dichas máquinas, la velocidad de cada transportador se puede ajustar independientemente de la velocidad del sinfín correspondiente. Si se requiere más mezcla en un lado de la máquina que en el otro, la velocidad del transportador en ese lado es aumentada por el operador de la pavimentadora o por el sistema de control de flujo automático para entregar más MAC a los sinfines, manteniendo así la cabeza de material frente a la regla consistente.

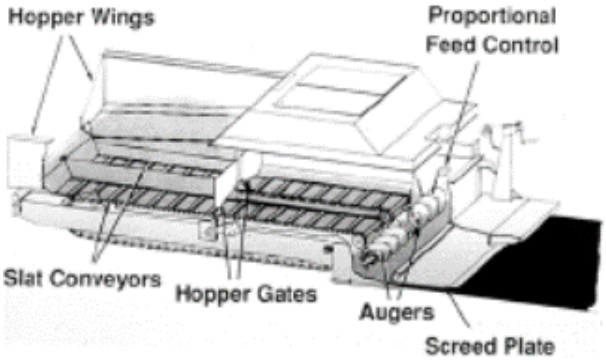


FIGURA 15-6 Flujo de material a través de la pavimentadora.

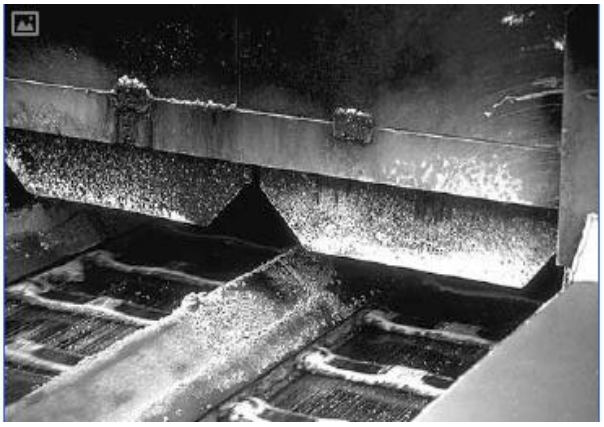


FIGURA 15-7 Compuertas de flujo en la parte posterior de la tolva de la pavimentadora.

Sinfines: La mezcla transportada a la parte trasera de la unidad tractora por los transportadores de listones se deposita delante de los sinfines (ver Figuras 15-8 y 15-9). Al igual que los dos transportadores de listones, los sinfines a cada lado de la pavimentadora están accionados de forma independiente entre sí. Sin embargo, el sinfín en un lado de la pavimentadora generalmente se ejecuta en conjunción con el transportador de listones en ese mismo lado de la pavimentadora (a menos que se use una pavimentadora con transportador independiente y motores de accionamiento de sinfín, y sin compuertas de flujo). Además, el operador de la pavimentadora tiene la opción de hacer funcionar el sistema de cinta transportadora y sinfín izquierdo o derecho en modo manual o automático. En el modo automático, un sensor de control de alimentación en ese lado de la máquina controla el nivel de material en el borde exterior del sinfín. Es extremadamente importante que los sinfines transporten una cantidad constante de mezcla a través de la parte delantera de la regla para que la cabeza de material frente a la regla permanezca lo más constante posible.

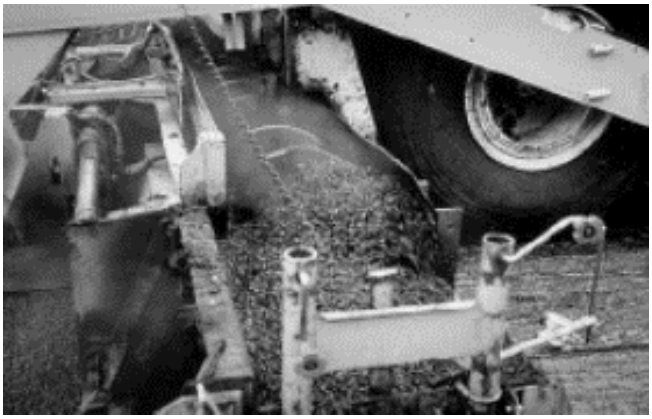


FIGURA 15-8 Sinfines de pavimentación.

La mezcla colocada en la cámara del sinfín desde los transportadores de listones se distribuye a lo ancho de la regla de la pavimentadora mediante el movimiento de los dos sinfines independientes. En la unión de los dos sinfines en el centro de la pavimentadora, adyacente a cada lado de la caja de engranajes del sinfín, generalmente hay un sinfín de forma diferente (sinfín inverso) o una paleta que se usa para meter la mezcla debajo de la caja de engranajes y garantizar que la colocación de la mezcla en este lugar sea la misma que en el resto del ancho de la mezcla que se está colocando. En la Figura 15-10 se muestra una pavimentadora equipada con un par de paletas inversas.

Si no se coloca suficiente mezcla debajo del centro de la regla debido a la falta de mezcla metida debajo de la caja de engranajes, se puede ver una raya longitudinal detrás de la pavimentadora en el centro de la regla. A veces se piensa que tal raya es una forma de segregación porque la textura de la superficie del tapete en ese lugar es más abierta que la de la mezcla adyacente y generalmente es de color más oscuro. Esto, sin embargo, no es realmente un problema de segregación. Más bien, la textura más áspera y el color más oscuro generalmente son causados por una falta de mezcla colocada debajo de la caja de engranajes y, por lo tanto, que pasa por debajo de la regla en ese punto. De hecho, si se mide cuidadosamente, la elevación de la mezcla en la raya será ligeramente inferior a la de la mezcla circundante: la raya es un punto bajo en la superficie de la estera. Si se ve una raya en la caja de engranajes en el centro de la regla principal de la pavimentadora, se debe considerar la instalación de un sinfín inverso o un sistema de paletas en la pavimentadora si dicho sistema aún no está presente.

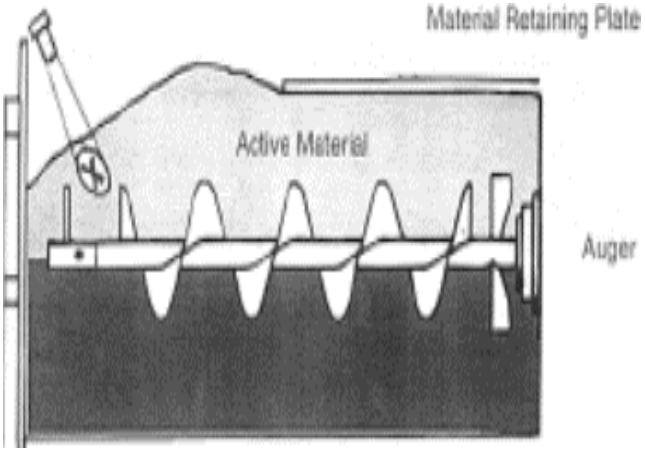
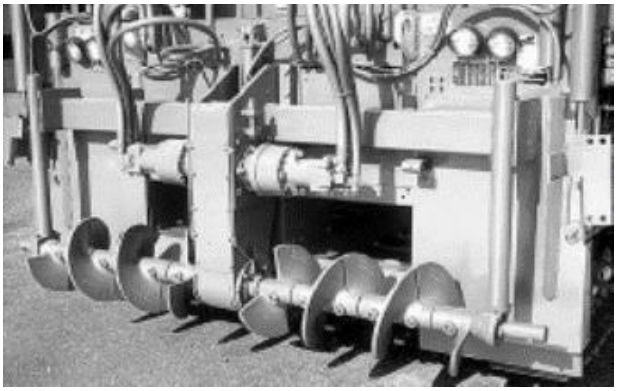


FIGURA 15-9 Esquema de la barrena de la pavimentadora.



FIGUR 15-10 Sinfín pavimentadora con caja de engranajes en el punto medio equipada con paletas inversas.

Si los sinfines inversos o las paletas están presentes, se deben hacer ajustes para meter más mezcla debajo de la caja de cambios; Las barrenas o paletas desgastadas deben ser reemplazadas si es necesario.

Las pavimentadoras modernas están equipadas con sinfines de altura variable - se puede cambiar la elevación del sinfín. La altura de la barrena normalmente se establece de acuerdo con la profundidad de pavimentación. Como regla general, los sinfines deben colocarse lo más bajo posible para minimizar la cantidad de mezcla transportada en la cámara del sinfín. Sin embargo, la elevación del tambor de la barrena nunca debe ser uniforme o inferior a la parte superior de la mezcla que se está colocando, ya que esto puede dar lugar a diferencias en la textura de la capa.

Funcionamiento del sistema de alimentación de material

La cantidad de mezcla transportada en la cámara del sinfín debe ser lo más constante posible. La profundidad adecuada del material en los sinfines está en el centro del eje del sinfín, como se ve en la Figura 15-11. El nivel de material transportado delante de la regla no debe ser tan bajo como para exponer la parte inferior de las paletas del transportador de tornillo. Además, el nivel de mezcla suministrada a la regla nunca debe ser tan alto como para cubrir la parte superior del sinfín, como se muestra en la figura.

Si el sistema de alimentación está configurado y funciona correctamente, los transportadores de listones y sinfines a cada lado de la pavimentadora rara vez se apagarán; operarán de manera lenta y continua. Esta acción continua de los transportadores y sinfines se logra estableciendo la posición adecuada para las compuertas de flujo de la tolva (que si hay) y determinando el ajuste de velocidad correcto para los transportadores de listones o tornillos y para sinfines.

La clave para la colocar una capa de pavimento uniforme es el uso del sistema de alimentación de material para mantener una cabeza (nivel) constante de material frente a la regla/solado, principalmente manteniendo los transportadores de listones y sinfines funcionando lo más cerca posible del 100 por ciento, siendo la clave para colocar una capa. El funcionamiento intermitente de los sistemas del transportador de tablillas y del sinfín puede provocar irregularidades en la capa, así como sombras del sinfín y ondulaciones en la capa detrás de la regla, como se explica en otro apartado de esta sección.

Hay dos tipos de sistemas de control de alimentación de material que se utilizan convencionalmente en las máquinas pavimentadoras - velocidad constante y velocidad variable o proporcional. Muchas pavimentadoras modernas tienen un sistema de alimentación automática basado en el control sónico.

Velocidad constante: Como se señaló anteriormente, el transportador de listones y el sinfín en un lado de la pavimentadora actúan independientemente del transportador de listones y el sinfín en el otro lado de la pavimentadora. En las pavimentadoras más antiguas, la velocidad de los transportadores de listones y sinfines es constante en el modo manual. El operador de la pavimentadora puede controlar la cantidad de mezcla que se transporta de regreso a la regla solo ajustando la altura de las compuertas de flujo.

Si las compuertas están colocadas demasiado altas, el sistema de alimentación de material proporcionará demasiada mezcla asfáltica a los sinfines cuando los transportadores de listones y los sinfines estén funcionando. El resultado será un aumento significativo en la cabeza del material frente a la regla y un aumento de la presión sobre la regla. Este aumento de presión a su vez cambiará el ángulo de ataque de la regla y aumentará el espesor de la alfombra que se está colocando, y el ángulo de ataque de la regla aumentará ligeramente a medida que la regla gire alrededor de su punto de pivote. Por otro lado, si las compuertas están colocadas demasiado bajas, el sistema de alimentación de material no podrá entregar suficiente material a los sinfines, reduciendo así el nivel de material frente a la regla y la fuerza ejercida sobre ella.

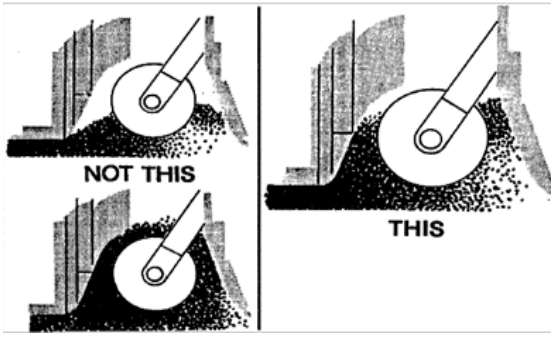


FIGURA 15-11 Niveles correctos e incorrectos de mezcla en la cámara del sinfín de la pavimentadora.

El resultado será una reducción en el espesor de la capa que se coloca a medida que la regla gira alrededor de su punto de pivote y una disminución en el ángulo de ataque de la regla.

Como se mencionó, con estos sistemas antiguos, la única forma en que el operador puede controlar el nivel del material frente a la regla es mediante el ajuste adecuado de las compuertas de flujo en la parte posterior de la tolva de la pavimentadora. Las compuertas de flujo y los interruptores de encendido y apagado del alimentador deben colocarse en una posición que permita que los transportadores de listones y sinfines a cada lado de la máquina funcionen lo más cerca posible del 100 por ciento del tiempo. Para la mayoría de las operaciones de pavimentación, si las compuertas de flujo están configuradas correctamente para la velocidad de la pavimentadora, el ancho de pavimentación y el espesor de la capa, los sistemas de cinta transportadora y barrena generalmente funcionarán entre el 80 y el 90 por ciento del tiempo bajo control manual.

Se puede colocar un sensor de control de flujo o paleta a cada lado de la pavimentadora cerca de los extremos exteriores de las barrenas. Este sensor monitorea la cantidad de mezcla que se transporta frente a la regla y activa el transportador de listones y el sinfín correspondientes cuando se necesita mezcla.

Este sistema de control de flujo es realmente un interruptor de límite en el que una varilla mecánica o paleta flota sobre la mezcla y rota el eje del interruptor de límite a medida que cambia el nivel de mezcla frente a la regla. Cuando se detecta demasiada mezcla frente a la regla, el interruptor de límite apaga el sistema de eliminación de mezcla. Cuando se necesita mezcla, la paleta gira hacia abajo sobre la menor cantidad de mezcla frente a la regla y se pone en marcha el sistema de cinta. Sin embargo, incluso con el uso de un sensor de control de flujo, la cantidad de mezcla entregada a la regla en realidad solo se controla mediante la posición (elevación) de la compuerta de flujo en la parte posterior de la tolva de la pavimentadora. La altura de cada compuerta de flujo se establece para mantener constante el nivel de mezcla asfáltica caliente MAC frente a la regla, cerca del centro del eje del sinfín, y el sistema de suministro funcionando lo más cerca posible del tiempo completo. Esto es muy difícil de lograr, especialmente si la pavimentadora se utiliza para nivelar una superficie de pavimento existente, donde la demanda de mezcla es variable.

Los cambios en el nivel del material pueden ser el resultado de la operación de apagado y encendido de un sistema de control de alimentación de velocidad constante. Estos cambios pueden, a su vez, causar sombras y ondulaciones en la superficie de la mezcla. Este problema se puede evitar mediante el uso de un sistema de control de alimentación automático sónico o de velocidad variable.

Velocidad variable (proporcional): Algunos pavimentadores están diseñados para que, en modo manual, el operador pueda seleccionar una de varias velocidades para los transportadores de listones, cada uno equivalente a un porcentaje de la velocidad máxima del transportador. Una vez seleccionada la velocidad del transportador, la velocidad del sinfín se ajusta proporcionalmente. El operador es responsable de controlar la velocidad de los transportadores de listones y sinfines para mantener un nivel constante de mezcla de asfalto frente a la regla de la pavimentadora. Sin embargo, el flujo de material hacia la regla sigue siendo esencialmente regulado por la altura de las compuertas de flujo de la tolva y por el encendido y apagado de las cintas trasportadoras y los sinfines en cada lado de la pavimentadora. Con este sistema manual, los cambios en la demanda de mezcla se satisfacen cambiando la velocidad del sistema de alimentación.

También se puede usar un sensor de control de flujo o alimentación con este sistema para monitorear la cantidad de mezcla asfáltica en la cámara de sinfín frente al solado. A medida que el nivel de MAC frente a la regla sube y baja, la velocidad del sistema de alimentación aumenta o disminuye para mantener un nivel constante y un flujo uniforme de mezcla a través del ancho de la regla. Para que el sistema de control de alimentación automático funcione correctamente, la paleta o varilla del sensor de alimentación debe ubicarse lo más cerca posible de los extremos exteriores de los sinfines. Si se utilizan extensiones de la regla de la pavimentadora rígida, El brazo de control debe montarse más allá de los extremos de las barrenas, justo dentro de la puerta final de la solera de la pavimentadora. Si se utiliza una regla hidráulicamente extensible, la ubicación del brazo de control del sensor de alimentación debe ser tal que se minimice la cantidad de mezcla transportada frente a las extensiones. En la mayoría de los casos, esto significa que el sensor debe estar montado en la puerta final de la solera de la pavimentadora y la paleta o varita del sensor colgada solo una corta distancia frente al extremo de la regla extensible.

Para extensiones de solado hidráulico montadas en la parte trasera, desacreditadas más adelante en esta sección, es importante minimizar la cantidad de mezcla transportada delante del solado en la extensión. Se debe emplear un sistema de sensor de control de flujo para limitar severamente la cantidad de MAC transportada frente a la extensión de la regla. Ese sensor debe montarse en la puerta final del solado justo en frente del borde delantero de la regla.

Control sónico: Las pavimentadoras modernas suelen estar equipadas con un sistema de alimentación automático que utiliza ultrasonidos para controlar la cantidad de mezcla que transportan los sinfines. Este sistema funciona básicamente sobre la misma base que un sistema de interruptor de límite de velocidad variable midiendo la cantidad de mezcla delante de la regla y controlando la velocidad de los transportadores de listones y el sistema de sinfín para mantener una cabeza constante de material en el solado. El sistema de alimentación sónica utiliza ondas sonoras reflejadas para detectar el nivel de mezcla. El sistema envía pulsos varias veces por segundo. Se inicia un circuito de temporización cuando se envía el pulso y se detiene cuando se recibe el primer eco. El período de tiempo entre el momento en que se envía el pulso y se recibe el eco se utiliza para calcular la distancia al material que se detecta – el nivel del material en la cámara sinfín. A continuación, el controlador varía la velocidad de los transportadores y sinfines en cada lado de la máquina proporcionalmente para mantener un nivel constante de mezcla a través de la parte frontal de la regla.

UNIDAD DE REGLA

La regla, remolcada por el tractor, establece el espesor de la capa de asfalto y proporciona la textura inicial a la nueva superficie. Además, por su peso y acción vibratoria, la regla imprime cierto nivel de densidad al material que se está colocando. La Figura 15-12 muestra la regla de extendido y los brazos de remolque.

El concepto de regla pavimentadora de flotación libre se desarrolló a principios de la década de 1930. Este concepto permite a la regla de extendido, que está unida a la unidad tractora en un solo punto a cada lado de la máquina, compensar los cambios de pendiente o

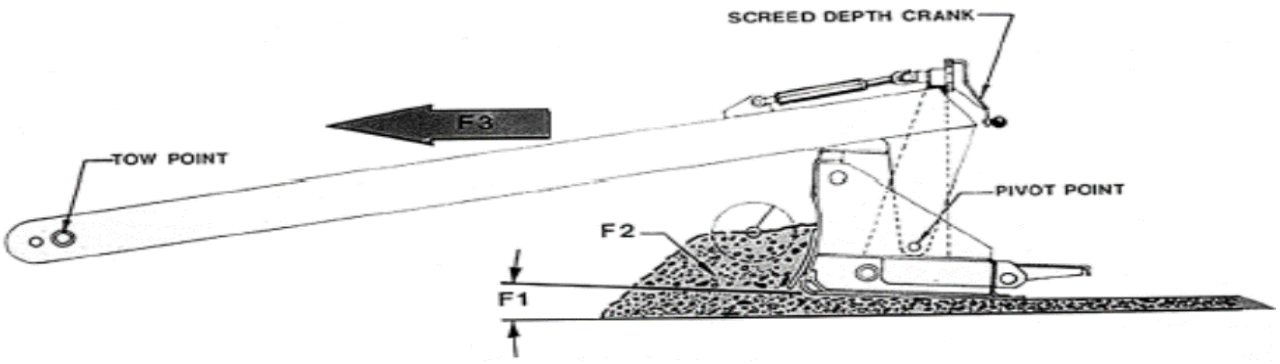


FIGURA 15-12 Acción del solado/regla de la pavimentadora y los brazos de remolque

elevación experimentados por la distancia entre ejes (neumáticos de goma u orugas) de la unidad tractora.

El concepto de regla flotante se emplea en todas las pavimentadoras de asfalto modernas que se utilizan hoy en día.

Puntos de remolque (tracción)

La unidad de regla se fija a la unidad tractora en un solo punto a cada lado de la pavimentadora. Este punto, que se muestra en la Figura 15-12, se denomina punto de remolque (o de tracción). Los puntos de remolque son en realidad conexiones de tipo pasador que permiten que los brazos de nivelación (también llamados brazos laterales o brazos de tracción) de la regla giren o pivoten alrededor de esos puntos. Esta conexión de pasador entre los puntos reduce la transmisión de movimiento entre el tractor y las unidades de la regla.

El concepto de los puntos de remolque y la regla flotante permite que la unidad tractora proporcione la distancia entre ejes para la unidad de regla. La regla gira entonces alrededor de los puntos de remolque, que se encuentran en el centro de la longitud de la distancia entre ejes en la unidad tractora y responden al grado promedio que está abarcando la distancia entre ejes del tractor. Al pavimentar pendientes irregulares, el tractor puede pivotar como un balancín sin cambiar la línea de tracción de la regla.

Para que el principio de regla flotante funcione correctamente bajo control manual, es importante que los puntos de remolque a ambos lados del tractor estén al mismo nivel sobre el suelo. (El control automático de la regla se aborda en la Sección 16). La posición de los puntos de remolque se puede ajustar subiendo o bajando las varillas en las que están montados los puntos de remolque. Para la mayoría de las mezclas asfálticas, los puntos de remolque se colocan cerca del centro de la varilla. Sin embargo, o algunas mezclas asfálticas, como las que son muy rígidas o muy blandas, puede ser ventajoso subir o bajar la elevación de los puntos de remolque para mejorar la textura de la capa que se está colocando. (Si la pavimentadora se opera bajo control automático de nivel y pendiente, como se discute en la siguiente sección, la elevación de los puntos de remolque generalmente se centra cuando comienza la pavimentación. Luego, la ubicación cambia a medida que el pavimento avanza para mantener el ángulo de ataque adecuado de la regla.)

Cuando algunas pavimentadoras se operan bajo control manual y los puntos de remolque son demasiado altos, la parte delantera de la regla se inclina hacia abajo para mantener el ángulo de ataque adecuado para el espesor de capa deseada. Esto puede resultar en un desgaste prematuro en el corte y el borde de ataque de la regla, una reducción en la suavidad de la capa y una disminución en el grado de compactación impartido a la mezcla. Por otra parte, cuando los puntos de remolque están demasiado bajos, la parte delantera de la regla se inclina hacia arriba para mantener el grosor correcto de la mezcla asfáltica que se está colocando. Entonces puede producirse un desgaste adicional en el borde de salida de la regla.

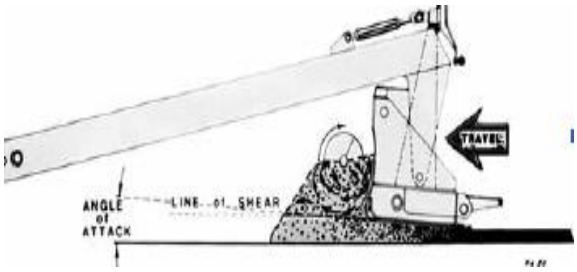


FIGURA 15-13 Ángulo de ataque para la regla de la pavimentadora.

Para una pavimentadora no equipada con controles automáticos de la regla, normalmente hay una relación de 8:1 entre el movimiento de los puntos de remolque y el cambio en el ángulo de adherencia del borde frontal de la regla de la pavimentadora. Así, si los puntos de remolque se desplazan 25 mm (1 pulg.) hacia arriba, el ángulo de ataque de la regla aumentará 3 mm (1⁄8 pulg.). Como se explica en detalle más adelante, la pavimentadora debe avanzar aproximadamente cinco longitudes de los brazos niveladores antes de que la regla se desplace hasta el nuevo nivel de los puntos de remolque y las fuerzas sobre la regla vuelvan a estar en equilibrio.

La combinación de los puntos de giro de la regla en los extremos de los brazos niveladores fijados al tractor y el dispositivo de control del espesor en la regla permite ajustar el ángulo de ataque de la unidad de la regla. El ángulo de ataque se ilustra en la Figura 15-13. Debido a la forma en que la regla está fijada al tractor, la regla actúa de forma similar a la de un esquiador acuático arrastrado por una lancha motora. A medida que la lancha va más rápido, el esquiador acuático se aleja más del agua y el ángulo de ataque de los esquís acuáticos disminuye. Del mismo modo, a medida que la pavimentadora va más rápido, el ángulo de ataque de la regla disminuye y la capa que coloca la pavimentadora es más delgada. Si el esquiador viaja sobre una superficie de agua tranquila, el ángulo de ataque de los esquís permanecerá constante. Sin embargo, si el esquiador intenta cruzar la estela del barco, el ángulo de ataque de los esquís aumentará a medida que los esquís suban por la ola. Del mismo modo, si la cabeza del

material delante de la regla de pavimentadora aumenta, el ángulo de ataque de la regla aumentará a medida que la regla reaccione al aumento de la fuerza sobre ella. El resultado será una capa más gruesa colocada por la pavimentadora.

El control manual de la regla se examina en detalle más adelante, pero antes hay que repasar las fuerzas que actúan sobre la regla y los efectos del arranque y la parada de la pavimentadora.

Fuerzas que actúan sobre la regla

Dos fuerzas principales actúan constantemente sobre la regla de la pavimentadora a medida que ésta extiende la mezcla. La primera es la fuerza de arrastre del tractor, que varía según aumenta o disminuye la velocidad de la pavimentadora. La segunda es la cabeza de material que empuja contra la regla. A medida que cambia la cantidad de material asfáltico en la cámara del sinfín que empuja contra la regla, también cambia la fuerza neta que actúa sobre la regla. A medida que cambian las fuerzas que actúan sobre la regla, ésta debe alcanzar un nuevo ángulo de ataque para compensar el cambio en la fuerza que actúa sobre ella.

Las fuerzas sobre la regla deben estar en equilibrio (la suma de todas las fuerzas debe ser igual a cero) para que la regla permanezca en un ángulo de ataque constante mientras es remolcada por la unidad tractora. Cuando se produce un cambio en cualquiera de las fuerzas, la regla se eleva o desciende, y el espesor de la capa que se está colocando cambia en consecuencia. También se producirá un cambio en el ángulo de ataque de la regla. La regla reaccionará al cambio de la fuerza contra ella hasta que alcance una nueva elevación de equilibrio en la que las fuerzas estén equilibradas.

Velocidad de la pavimentadora

Dado que la velocidad de la pavimentadora influye en gran medida en el ángulo de ataque de la regla de extendido, es una buena práctica de pavimentación mantener la velocidad lo más constante posible durante las operaciones de colocación. En caso de control manual del flujo de material y de la regla, si las demás fuerzas que actúan sobre la regla se mantienen constantes, un aumento de la velocidad de la pavimentadora se traduce en una disminución del espesor de la capa de asfalto extendida. Esto ocurre a mayor velocidad de la pavimentadora porque el ángulo de ataque de la regla ha cambiado. Al aumentar la velocidad, el ángulo de ataque de la regla disminuye y el espesor de la capa colocada también disminuye hasta que se alcanza de nuevo una condición de equilibrio. Del mismo modo, una disminución de la velocidad de la pavimentadora provoca un aumento del espesor de la capa. A continuación, la regla sube a una nueva elevación hasta que se restablece el equilibrio.

Sin embargo, lo anterior sólo se produce mientras no se realicen otros cambios en el sistema, es decir, si el nivel de los puntos de remolque y la cantidad de mezcla en la cámara del sinfín se mantienen constantes. No obstante, debe tenerse en cuenta que, al aumentar o disminuir la velocidad de la pavimentadora, también debe modificarse la velocidad de alimentación de MAC a través de la pavimentadora para mantener una altura constante de material en la cámara del sinfín. A medida que aumenta la velocidad de la pavimentadora, si los transportadores de listones no suministran mezcla adicional a los sinfines para compensar el cambio en la demanda de mezcla, habrá menos mezcla disponible para pasar por debajo de la regla y el espesor de la capa se reducirá aún más.

Si el operador de la pavimentadora modifica manualmente la cantidad de mezcla que se devuelve a los sinfines o si los sensores de control de alimentación realizan la misma función automáticamente, el ángulo de ataque de la regla permanece constante debido al efecto de la cabeza de material delante de la regla. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, el espesor de la capa colocada varía debido al cambio de velocidad de la pavimentadora. Por lo tanto, para mantener constante el espesor de la capa al cambiar la velocidad de la pavimentadora, es necesario modificar manualmente el ajuste de los tornillos de control de espesor (manivelas de profundidad) situados en la regla de extendido. Para aumentar la velocidad del pavimentador, la manivela de profundidad debe girarse de modo que la regla gire alrededor de su punto de giro y el ángulo de ataque se aumente manualmente para compensar la disminución del ángulo de ataque que se produce de forma natural al aumentar la velocidad. Del mismo modo, para reducir la velocidad de la pavimentadora, la manivela de profundidad debe girarse en la dirección opuesta, de modo que el ángulo de ataque de la regla se reduzca manualmente para compensar el aumento automático del ángulo de ataque que se produce cuando disminuye la velocidad de la pavimentadora. La cantidad de cambio manual necesario en el ajuste de los tornillos de control de espesor, hacia arriba o hacia abajo, depende de la cantidad de cambio en la velocidad de la pavimentadora, más rápida o más lenta, respectivamente.

Aquellos que no están familiarizados con las fuerzas que actúan sobre la regla de la pavimentadora a menudo asumen que el espesor de la capa que se está colocando aumenta a medida que aumenta la velocidad de la pavimentadora (para una cabeza constante de material mantenida delante de la regla). Esta suposición es incorrecta, como se ha explicado anteriormente. De hecho, ocurre lo contrario. Por tanto, para comprender plenamente el efecto de un cambio en la velocidad de la pavimentadora sobre el ángulo de ataque de la regla, hay que recordar que para que las fuerzas sobre la regla estén en equilibrio, cada cambio en la fuerza debe ir

acompañado de un cambio igual, pero opuesto, en la fuerza.

Es muy deseable mantener constante la velocidad de la pavimentadora para mantener constante el ángulo de ataque de la regla y, por tanto, constante el espesor de la capa que se está colocando. Por tanto, la velocidad de la pavimentadora debe ajustarse a la producción de la planta de asfalto y al grosor y ancho de la capa de rodadura. La velocidad máxima de la pavimentadora puede determinarse para diferentes combinaciones de velocidades de producción de la planta y espesores de la capa.

A modo de ejemplo, para una capa de 3,7 m (12 pies) de ancho, la pavimentadora debe funcionar a una velocidad de sólo 4,6 m (15 pies) por minuto para colocar toda la mezcla proporcionada por una planta que produce MAC a un ritmo de aproximadamente 91 toneladas (100 toneladas) por hora a un espesor de capa compactada de 25 mm (1 pulg.). Del mismo modo, para una producción de 454 toneladas (500 toneladas) por hora, para la misma anchura de capa de 3,7 m (12 pies) y para un espesor de capa compactada de 50 mm (2 pulgadas), la velocidad máxima de la pavimentadora debería ser de aproximadamente 11,5 m (38 pies) por minuto.

Como se ha indicado anteriormente, para conseguir una capa lo más lisa posible detrás de la regla de pavimento/extendido, es esencial mantener la pavimentadora en movimiento a una velocidad constante en todo momento. No tiene sentido hacer funcionar la pavimentadora más deprisa de lo necesario para colocar toda la mezcla suministrada y luego detenerse a esperar a que llegue el siguiente camión al lugar de extendido. El tema de reducir la velocidad de la pavimentadora o detenerla entre cargas de mezcla se trata más adelante.

Material de cabeza

Si aumenta el volumen de mezcla en la cámara del sinfín, también aumenta la fuerza sobre la regla, lo que hace que ésta gire alrededor de su punto de giro y se eleve. Esta acción hace que el ángulo de ataque de la regla aumente hasta que se alcanza una nueva posición de equilibrio, lo que resulta en la colocación de una capa más gruesa. Si se reduce la cantidad de material transportado por los sinfines, se reduce el espesor de la capa, a igualdad de los demás factores, ya que disminuye el ángulo de ataque de la regla. Por lo tanto, uno de los principales factores que afectan a la consistencia del espesor de la capa que se está construyendo es la consistencia de la cabeza de material (cantidad de MAC) delante de la regla de la pavimentadora.

La cabeza del material en la cámara del sinfín se ve directamente afectada por el funcionamiento de los transportadores de láminas y los tornillos sinfín a cada lado de la pavimentadora. Cuando los transportadores de láminas y tornillos sinfín están en funcionamiento, la mezcla se extrae de la tolva de la pavimentadora, atraviesa el túnel y los sinfines la distribuyen por la parte delantera de la regla. Mientras este flujo de material sea relativamente constante, la cabeza de material que empuja contra la regla se mantiene también relativamente constante, y la capa que se coloca tiene una textura lisa y consistente.

Sin embargo, si se permite que la altura del material varíe, la regla se mueve hacia arriba y hacia abajo en relación con las fuerzas que actúan sobre ella y en reacción a ellas. A medida que disminuye la cantidad de mezcla transportada por los sinfines, debido a la desconexión de los sistemas de transporte de listones y de sinfines, la regla se desplaza hacia abajo, reduciendo así el espesor de la capa situada detrás de la regla. A medida que los sistemas de transportadores de láminas y los tronillos sinfín se activan, se transporta más mezcla hacia los sinfines y a través de la parte delantera de la regla. Esto aumenta la fuerza sobre la regla y hace que se eleve a una nueva elevación, lo que da como resultado una capa más gruesa. Por lo tanto, la posición o el girode las compuertas de flujo es muy importante para regular la cantidad de mezcla delante de la regla.

La cabeza de material se ve afectada cada vez que se apagan y encienden los transportadores de láminas y los tornillos sinfín. Esto es especialmente cierto si la posición de las compuertas de flujo no está bien ajustadas inicialmente. Por este motivo, como se ha sugerido anteriormente, es importante utilizar un sistema de control de alimentación automático de velocidad variable o sónico, ya que este tipo de dispositivos mantienen los transportadores de láminas y los tornillos sinfín en funcionamiento la mayor parte del tiempo posible, siempre que las compuertas de caudal estén correctamente ajustadas. Esto, a su vez, mantiene la altura del material relativamente constante y permite a la regla colocar una capa de espesor uniforme. Una cabeza constante de material contra la regla del pavimentador también reduce significativamente la aparición de ondulaciones y sombras del sinfín.

Si la pavimentadora no está equipada con compuertas de flujo, la velocidad de los transportadores y los sinfines debe controlarse para mantener constante la altura del material. Sin embargo, en cualquier tipo de sistema, con o sin compuertas de flujo en la pavimentadora, una altura constante del material delante de la regla se asocia con una capa consistentemente suave detrás de la pavimentadora.

Otro factor que afecta la uniformidad de la cabeza de material frente a la regla es la temperatura de la mezcla. Si se deposita una carga de material frío en la tolva de la pavimentadora y se transporta de vuelta a la regla mediante los transportadores de listones y los sinfines, la mezcla más fría y rígida aumenta la fuerza que actúa sobre la regla y hace que ésta se eleve, aumentando el

grosor de la capa colocada. Si, por el contrario, se entrega una carga caliente de mezcla a la pavimentadora, la disminución de la viscosidad del material aglutinante reduce la rigidez de la MAC y reduce la fuerza de la mezcla sobre la regla cuando la mezcla se deposita delante de ella. Esta situación provoca la caída de la regla y reduce el espesor de la capa.

Línea de tracción

La línea de tracción se refiere al ángulo con el que se tira de la regla hacia delante. Por lo general, la superficie del pavimento es más lisa cuando la fuerza de tracción se aplica de forma relativamente paralela a la pendiente por la que circula el tractor. Por lo tanto, la elevación de los puntos de remolque debe establecerse en relación con el espesor de la capa que se está construyendo. Como regla general, las capas finas de MAC requieren un ajuste inicial más bajo del punto de remolque, mientras que las capas gruesas de mezcla requieren un ajuste inicial más alto. Si se ajusta la altura inicial del punto de remolque para que coincida con el grosor del material que se va a colocar, las fuerzas de remolque aplicadas a la regla serán relativamente paralelas a la rasante.

En el caso de una capa relativamente fina, si el ajuste del punto de remolque es extremadamente alto, las fuerzas de remolque se aplican en un ángulo ascendente que aumenta las fuerzas de elevación que actúan sobre la regla. Para mantener un espesor de material determinado, el ángulo de ataque de la regla debe reducirse para compensar el aumento de la elevación. En estas condiciones, la regla se desplaza con un ángulo de ataque ligeramente descendente. El resultado es una textura deficiente de la capa y un desgaste extremo en la parte delantera de la parte inferior de la placa de la regla. Además, cuando la pavimentadora se detiene, la regla tiene más tendencia a balancearse o tambalearse a medida que el tractor relaja la tensión sobre la regla. Esto puede aumentar el asentamiento de la regla e introducir protuberancias en la capa.

Para una capa relativamente gruesa, si el ajuste del punto de remolque es extremadamente bajo, las fuerzas de remolque se aplican en un ángulo descendente que disminuye las fuerzas de elevación aplicadas a la regla. Para mantener un espesor determinado de MAC, debe aumentarse el ángulo de ataque de la regla para compensar la disminución de la elevación. En estas condiciones, la regla se desplaza con un ángulo de ataque ligeramente ascendente, y sólo la parte trasera de la regla compacta y termina de extender la mezcla. Esto provoca una textura deficiente de la capa y un desgaste extremo de la parte trasera de la parte inferior de la plancha de la regla. De este modo, se consigue un mayor control de las fuerzas aplicadas a la regla mediante el ajuste de los puntos de remolque en relación con el grosor de la capa que se está colocando.

EFECTOS DE LA PARADA Y ARRANQUE DE LA PAVIMENTADORA

PARADAS CORTAS

Si la pavimentadora puede funcionar continuamente a una velocidad constante sin detenerse, la suavidad de la mezcla colocada debería ser excelente, siempre y cuando el operador de la regla no cambie continuamente el ángulo de ataque de la regla girando las manivelas de control de espesor y la cabeza de material delante de la regla permanezca constante.

Si se utilizan camiones de descarga inferior para transportar la mezcla desde la planta hasta la máquina de pavimentación, existe la posibilidad de que la operación de pavimentación sea continua si hay una hilera de mezcla suficientemente larga delante de la pavimentadora. Sin embargo, si el siguiente camión no llega al lugar de pavimento antes de que se alcance el final de la hilera, la pavimentadora tendrá que detenerse y esperar hasta que el camión haya colocado más MAC en la hilera y esté disponible para ser recogida por el elevador de hileras de la pavimentadora.

Si se utiliza un MTV para transportar la mezcla desde los vehículos de transporte hasta la tolva de la pavimentadora, también existe la posibilidad de que la operación de pavimentación sea continua siempre que los camiones de transporte lleguen al MTV antes de que se agote la mezcla. Dado que la MTV es esencialmente un contenedor de sobrecarga sobre ruedas, como se explica en la Sección 13, la cantidad de mezcla que puede transportar es limitada, incluso teniendo en cuenta la mezcla adicional en la tolva extendida de la pavimentadora. Si el siguiente camión de transporte no llega a tiempo para evitar que la MTV y la tolva de la pavimentadora se vacíen, la operación de pavimentación deberá detenerse.

Si se utilizan camiones de descarga trasera o de descarga en vivo para transportar la mezcla a la tolva de la pavimentadora, es poco probable que se pueda realizar una operación de pavimentación continuo a menos que la velocidad de extendido sea muy lenta. Dado que la velocidad de la pavimentadora afecta al ángulo de ataque de la regla y, por tanto, a la suavidad de la capa que se extiende, mantener una velocidad constante sin detenerse es un objetivo deseable pero poco realista. Para que la pavimentadora pueda seguir avanzando a la velocidad de pavimentación seleccionada mientras se completa el proceso de intercambio de camiones, tendrían que ocurrir las siguientes cosas de forma muy eficiente si se utilizaran camiones de descarga final: la plataforma del camión vacío tendría que bajarse, ese camión tendría que alejarse de la pavimentadora, el siguiente camión tendría que retroceder hasta la pavimentadora, la plataforma de ese camión tendría que levantarse (si no se hace con

antelación, como debería hacerse para mover la mezcla de nuevo contra la compuerta trasera del camión; véase la Sección 13), y la compuerta trasera tendría que abrirse y la mezcla tendría que entregarse en la tolva de la pavimentadora. Todo esto tendría que ocurrir antes de que la cantidad de mezcla en la tolva de la pavimentadora se hubiera reducido a un nivel por debajo de la parte superior de las compuertas de flujo de la tolva, de forma que la cabeza de material delante de la regla no se viera afectada. En los proyectos de pavimentación reales, este nivel de eficacia no suele obtenerse de manera consistente.

Típicamente, el operador de la pavimentadora empieza a ralentizarla cuando el camión de transporte está vacío, se acaba la hilera o la MTV está casi vacía. El operador suele esperar que llegue el siguiente camión antes de que la pavimentadora se quede sin mezcla. A veces ocurre, pero a menudo no, y la pavimentadora se detiene. Sin embargo, a medida que se reduce la velocidad de la pavimentadora, el ángulo de ataque de la regla cambia (aumenta) y el grosor de la capa aumenta ligeramente. Si se vacía la tolva de mezcla, se reduce la cabeza de material delante de la regla, disminuye el ángulo de ataque de la regla y también disminuye el grosor de la capa - se crea una pendiente gradual en la superficie del pavimento.

Una vez que se ha introducido mezcla nueva en la tolva vacía de la pavimentadora, ya sea desde el vehículo de transporte, desde el elevador de hileras o desde el MTV, el operador de la pavimentadora suele poner en marcha los transportadores de láminas de la pavimentadora y tira de una cantidad de mezcla hacia los sinfines. La cabeza de mezcla en la cámara del sinfín se acumula y el operador lleva rápidamente la pavimentadora a la velocidad de pavimentación. La elevada carga de material hace que la regla se eleve y que aumente el espesor de la mezcla. Como la pavimentadora alcanza rápidamente la velocidad de pavimentación, la velocidad de la pavimentadora tiene poco efecto sobre el ángulo de ataque de la regla, dado el tiempo de reacción retardado de la regla. El efecto neto de la elevada carga de material y el rápido aumento de la velocidad de la pavimentadora es una sección de pavimento más gruesa - se forma un bache en la superficie del pavimento.

Si la mezcla en el camión de transporte está segregada, y si esa mezcla segregada se entrega en la tolva vacía de la pavimentadora tanto desde el final de una carga de camión como desde el principio de la siguiente carga de camión, las partículas de árido grueso segregado se llevarán de vuelta a los sinfines y se verterán en la superficie del pavimento inmediatamente delante del punto bajo que acaba de construir la regla. Si esto ocurre, la segregación de camión a camión (véase el apartado 13) será tanto percibida (como un hundimiento gradual seguido de un bache en la superficie del pavimento) como visible.

Si es necesario detener la pavimentadora porque no se dispone temporalmente de mezcla adicional, deberá hacerse con la mayor rapidez y suavidad posible, y antes de que el nivel de mezcla de la tolva descienda por debajo de la parte superior de las compuertas de flujo o de las aberturas del túnel. De este modo se mantendrá constante la cabeza de material delante de la regla, al tiempo que se minimiza el efecto del cambio de velocidad de la pavimentadora sobre el ángulo de ataque de la regla debido al rápido cambio de velocidad.

Cuando llegue más MAC, deberá colocarse en la tolva de la pavimentadora "medio llena" desde el camión de transporte, el elevador de hileras o el MTV. A continuación, el operador de la pavimentadora deberá devolver la máquina a la velocidad de pavimentación deseada lo más rápidamente posible, minimizando de nuevo el efecto del cambio de velocidad de la pavimentadora sobre el ángulo de ataque de la regla. Dado que la altura del material se ha mantenido constante, se construirá una capa uniforme, sin baches ni segregación. Se ha comprobado que el procedimiento de "parada rápida, arranque rápido" para detener la pavimentadora proporciona una buena uniformidad de la capa y un espesor consistente de la misma.

PARADAS PROLONGADAS

Si se va a producir un retraso prolongado antes de la llegada del siguiente vehículo de transporte, se deberá considerar la posibilidad de construir una junta transversal, tal como se explica en el apartado 17. La duración aceptable de la demora, de modo que siga siendo posible colocar y compactar la mezcla para obtener el nivel requerido de uniformidad y densidad, dependerá de varios factores, incluidas las condiciones ambientales (temperatura del aire, temperatura de la superficie y velocidad del viento) en el lugar de pavimentación, la temperatura de la mezcla en la tolva de la pavimentadora y el espesor sin compactar de la capa bajo la regla.

Si se decide no construir una junta transversal, sino suspender temporalmente la operación de pavimentación hasta que llegue el siguiente camión de transporte, la pavimentadora deberá detenerse con la tolva lo más llena posible: por encima del nivel de mezcla que suele mantenerse en la tolva (por encima de la parte superior de las compuertas de flujo o de las aberturas del túnel) durante las paradas cortas. Mantener la tolva llena reducirá la velocidad de enfriamiento de la mezcla durante el tiempo de espera porque la mezcla permanecerá en una masa. Además, la pavimentadora no debe moverse hacia delante durante el período de espera, sino que debe permanecer en una posición hasta que la nueva mezcla esté disponible.

Existe una tendencia del operador de la pavimentadora a quedarse en un lugar por un tiempo, mover la pavimentadora hacia adelante una corta

distancia y luego esperar de nuevo. Si el siguiente camión no llega en breve, el operador suele repetir este proceso hasta que la tolva de la pavimentadora está vacía. Esta práctica es incorrecta y puede conducir a la construcción de un tramo significativo de pavimento de mala calidad.

Mientras la pavimentadora permanece en un lugar, la mezcla de la tolva se enfriará. La velocidad de enfriamiento se reducirá si la cantidad de mezcla en la tolva se mantiene constante; como se ha sugerido anteriormente, cuanto mayor sea la masa de mezcla, más lenta será la velocidad de pérdida de temperatura. Si la pavimentadora avanza periódicamente y la cantidad de mezcla en la tolva disminuye a medida que la pavimentadora coloca parte de la mezcla, la velocidad de enfriamiento de la mezcla restante aumentará. Dependiendo de cuándo llegue el siguiente camión de transporte y de cuántos movimientos realice la pavimentadora, el nivel de mezcla que quede en la tolva de la pavimentadora puede llegar a ser muy bajo y el material bastante frío.

Además, mientras la pavimentadora está parada, una cierta cantidad de mezcla quedará retenida en la cámara del sinfín: la cabeza de material situada delante de la regla. Dado que una parte de este MAC está en contacto con la superficie del pavimento subyacente, se producirá el enfriamiento de este material. Además, el MAC que se encuentra bajo la regla de extendido y en contacto con la superficie existente se enfriará: incluso más rápidamente que la mezcla en la cámara del sinfín- debido a la capa más fina y al menor volumen de la mezcla no compactada bajo la regla. Además, habrá una cierta distancia de mezcla detrás de la regla de extendido que no puede ser alcanzada por los rodillos. Normalmente, esta longitud es de aproximadamente 1 m (3 pies) y está relacionada con la cantidad de voladizo de la pasarela en la parte trasera de la regla y la curvatura del tambor o los neumáticos del rodillo. Para la mayoría de las pavimentadoras, la longitud total de mezcla desde la parte delantera de la cámara del sinfín hasta el borde delantero del tambor del rodillo que se enfriará rápidamente y quedará sin compactar oscilará entre 2 y 3 m (6 y 9 pies). Si la pavimentadora permanece en un punto mientras espera a que llegue el siguiente camión, esa distancia de mezcla tendrá normalmente un nivel de densidad inferior al del resto de la capa, ya que el esfuerzo de compactación de los rodillos no puede aplicarse en esta zona, y la mezcla estará más fría cuando la pavimentadora avance finalmente.

Se colocará aún más mezcla de baja densidad si la extendedora avanza periódicamente mientras espera la llegada de más mezcla. Cada vez que la pavimentadora se mueve y se detiene, otra distancia de mezcla en contacto con la superficie del pavimento existente entre los sinfines y los rodillos se enfriará rápidamente, y probablemente no se alcanzará la densidad adecuada. Además, al vaciar periódicamente la tolva, la mezcla restante no sólo perderá temperatura más rápidamente, sino que se reducirá la altura del material delante de la regla y se formará un hundimiento en la superficie del pavimento. Por lo tanto, una buena práctica de pavimentación dicta que la pavimentadora permanezca en una posición, con la tolva lo más llena posible y la cabeza de material constante, hasta que llegue mezcla adicional.

CONTROL MANUAL DE LA REGLA

En esta sección se revisan los procedimientos de control manual de la regla. El control automático de la regla y sus diferencias con el control manual se tratan en la sección 16.

MANIVELAS DE CONTROL DE ESPESOR

Como se ha indicado anteriormente, la regla está unida a los brazos de nivelación o de remolque a cada lado de la pavimentadora mediante puntos de pivote. El mecanismo de control de espesor, normalmente una manivela o un mango, permite mover o girar la regla alrededor de los puntos de giro. La clave de la acción niveladora de la regla es su capacidad, al girar alrededor de los puntos pivotantes y estar unida a la unidad tractora sólo en los puntos de remolque, para establecer una posición de equilibrio basada en las fuerzas que se le aplican. A medida que la mezcla pasa por debajo de la placa de la regla, ésta flota sobre la mezcla, estableciendo el espesor de la capa y la textura del material, además de proporcionar la compactación inicial de la MAC.

Para una posición constante de los puntos de remolque (la unidad tractora circula sobre una superficie plana y sin controles automáticos de la regla), la modificación del ajuste de los dispositivos de control del espesor cambia el ángulo de ataque de la regla y las fuerzas que actúan sobre ella. Esto a su vez hace que la regla se mueva hacia arriba o hacia abajo a una nueva elevación a medida que la pavimentadora avanza, alterando así el espesor de la capa que se está colocando. Sin embargo, la reacción de la regla a los cambios de posición de los ajustes de control de espesor no es instantánea. Más bien, hay un retraso en la reacción que permite a la regla promediar las variaciones en las fuerzas de entrada que actúan sobre ella.

RENDIMIENTO/PRODUCCIÓN

El operador de la regla tiende a girar continuamente las manivelas de control de espesor para controlar la cantidad de mezcla que se está pavimentando. Esto es especialmente cierto en los proyectos de pavimentación en los que el rendimiento - la cantidad de mezcla disponible para colocar (establecida en los planos) sobre una superficie determinada - está muy controlado. Con frecuencia, el operario de la regla comprobará el espesor

de la capa utilizando una varilla o regla (medidor de profundidad) en un punto determinado. Sobre la base de esa simple lectura, el operario suele ajustar la posición de las manivelas de control de espesor, modificando el ángulo de ataque de la regla y, por tanto, el espesor de la capa. Cuando, poco después, se realiza una comprobación y la profundidad medida no coincide con el espesor no compactado requerido, se vuelve a modificar el ajuste de las manivelas de control del espesor y el ángulo de ataque, de modo que el espesor de la capa vuelve a modificarse. Este enfoque de utilizar mediciones individuales para ajustar la regla no cumple el objetivo deseado de obtener una capa uniforme, ni tampoco suele cumplir el objetivo de controlar correctamente la cantidad de mezcla colocada a lo largo de una longitud determinada de pavimento.

Debido al tiempo de reacción retardada de la regla, que se analiza más adelante, existe un desfase significativo entre el momento en que se giran las manivelas de control del espesor y el momento en que la regla alcanza el nuevo punto de equilibrio en el nuevo nivel de espesor. Una sola medición de la profundidad de la capa no debe utilizarse para justificar un cambio en el ángulo de ataque de la regla. De hecho, ni siquiera dos o tres mediciones deben promediarse para determinar si es necesario modificar el ajuste de las manivelas de control del espesor. Si el espesor no compactado de la capa debe comprobarse con un medidor de profundidad, el espesor de la capa detrás de la regla debe medirse al menos cinco veces a intervalos longitudinales de 2 m (6 pies). Las manivelas de control de espesor deben entonces girarse sólo si el espesor medio medido es más de 6 mm (1⁄4 pulg.) menor o mayor que el espesor no compactado deseado de la capa.

Una forma mejor de comprobar el rendimiento, si debe medirse periódicamente, es determinar la distancia que debería cubrir la cantidad de mezcla en 10 cargas de camión de MAC, basándose en lo ancho y el espesor no compactado que se está colocando. A continuación, se compara esta distancia con la longitud que la pavimentadora ha colocado realmente utilizando el mismo número de toneladas (t) de mezcla. Si la distancia recorrida es significativamente inferior a la que debería haber sido, deberá modificarse el ajuste de las manivelas de control de espesor para reducir ligeramente el ángulo de ataque de la regla, disminuyendo la cantidad de mezcla colocada y, por tanto, aumentando la distancia que cubrirá una cantidad determinada de material. Si la distancia recorrida es significativamente mayor de lo que debería haber sido, las manivelas de control del espesor deben girarse un poco en sentido contrario para aumentar el espesor de la capa.

Tiempo de reacción de la regla

La Figura 15-14 muestra el tiempo de reacción de la regla cuando se produce un cambio en su ángulo de ataque, ya sea en la regla o en los puntos de remolque. Después de elevar los puntos de remolque, la regla tarda aproximadamente cinco veces la longitud de los brazos de nivelación o de remolque de la regla del pavimentado en completar el 99% del cambio, hacia arriba o hacia abajo, hasta la nueva elevación deseada. Esto significa que si la longitud de los brazos de nivelación es de 3 m (10 pies), la extendedora debe avanzar al menos 15 m (50 pies) antes de que la regla realice completamente la entrada requerida al dispositivo de control de espesor. Lo mismo ocurre si se modifica el ángulo de ataque de la regla girando las manivelas de control de espesor situadas en la parte trasera de la extendedora, en la propia regla.

Cambio del punto de pivote de la regla: A modo de ejemplo, supongamos que se desea aumentar el espesor de la alfombra que se está colocando de 25 mm (1 pulg.) a 37 mm (1 $^1/_2$ pulg.). Se hace una entrada a la manivela de control de espesor girándola para cambiar el ángulo de ataque de la regla. El movimiento del mecanismo de control de espesor hace que la regla se mueva alrededor de los puntos de giro y aumente el ángulo de ataque.

Como se muestra en la Figura 15-14, aproximadamente el 63% del cambio de espesor de la capa se logra después de que la pavimentadora se ha movido hacia adelante una distancia igual a la longitud de un brazo de nivelación, o 3 m (10 pies) en este ejemplo. A medida que la pavimentadora avanza otros 3 m (10 pies), se completa aproximadamente el 87% del cambio de espesor deseado. Aproximadamente el 95 por ciento del cambio de espesor se ha completado cuando se ha recorrido una distancia de 9 m (30 pies) - tres longitudes de brazo de nivelación de 3 m (10 pies) cada una. Sin embargo, sólo cuando la pavimentadora se ha desplazado por la calzada una distancia equivalente a cinco longitudes de brazo nivelador como mínimo, se ha completado el 99% o más del cambio de espesor.

El ejemplo anterior se aplica también a una reducción de los ajustes de control de espesor en la regla. Un operador de la regla que desee reducir la profundidad de la capa de asfalto gira la manivela de control de espesor en la dirección opuesta y hace que la regla gire alrededor de los puntos de giro. A medida que la pavimentadora avanza, la disminución del ángulo de ataque de la regla hace que se mueva hacia abajo, reduciendo así la cantidad de mezcla que se alimenta bajo la regla. La regla continúa su movimiento descendente hasta que las fuerzas que actúan sobre ella vuelven a estar en equilibrio. Si la profundidad de la capa de pavimento se cambiara de 37 mm (1 $^1/_2$ pulg.) a 25 mm (1 pulg.), la extendedora aún tendría que mover más de cinco longitudes del brazo nivelador antes de que se completara el 99% o más del cambio de espesor.

El tiempo de reacción también es igual al espesor si se reduce, desde cualquier nivel hasta otro, independientemente de la magnitud de cambio de espesor. Así pues, tanto si las manivelas se giran el

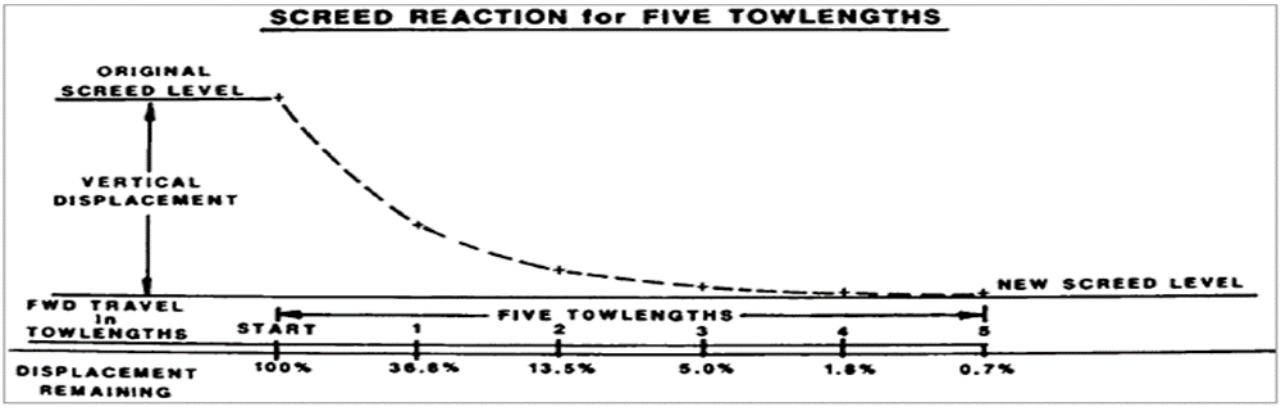


FIGURA 15-14 Tiempo de reacción de la regla.

número suficiente de veces para aumentar el espesor de 25 mm (1 pulg.) a 50 mm (2 pulg.) como si se giran más veces para aumentar el espesor de 25 mm (1 pulg.) a 75 mm (3 pulg.), se necesitarán al menos cinco veces la longitud del brazo de arrastre para completar el cambio. El tiempo de reacción también es el mismo si se disminuye el espesor, de cualquier nivel a cualquier otro.

Cuando una pavimentadora se maneja manualmente, es esencial que el operador de la regla sea consciente de este desfase en el tiempo de reacción de la regla. Como se ha señalado, la pavimentadora debe avanzar al menos una longitud de brazo nivelador antes de que se complete el 63% del cambio de espesor. Si se efectúa un segundo cambio en el ajuste de la manivela de control de espesor antes de que se haya realizado el primer cambio, éste nunca se completará, y aún se necesitará cinco veces la longitud adicional del brazo nivelador para que se lleve a cabo el segundo cambio de espesor. Por esta razón, es probable que los cambios continuos en el ajuste de los dispositivos de control de espesor sean muy perjudiciales para el desarrollo de una capa uniforme.

Cambio de la elevación del punto de remolque: Lo expuesto anteriormente se aplica a un cambio en la ubicación de los puntos de remolque del brazo nivelador de la regla en el lugar en el que está fijado a la unidad tractora. Si se desplazan los puntos de remolque, el cambio en su elevación se traduce en un cambio en el ángulo de ataque de la regla. Para que la regla reaccione al cambio de posición de los puntos de remolque y se desplace hacia arriba o hacia abajo hasta la nueva elevación, la pavimentadora debe avanzar una distancia aproximadamente cinco veces superior a la longitud del brazo nivelador de la máquina. Al pavimentar una carretera sin utilizar controles automáticos de inclinación y pendiente, la unidad tractora se mueve hacia arriba y hacia abajo en respuesta a la inclinación del pavimento subyacente. El movimiento vertical del tractor se traduce en un movimiento vertical de los puntos de remolque en los laterales de la pavimentadora. Cada vez que el tractor pasa por encima de una protuberancia o desnivel de la superficie del pavimento existente, cambia la elevación de los puntos de remolque. Esto, a su vez, altera el ángulo de ataque de la regla, haciendo que la cantidad de material que fluye bajo la regla disminuya o aumente. El hecho de que se necesite cinco veces la longitud del brazo nivelador antes de que la regla reaccione completamente a un cambio en la ubicación de los puntos de remolque permite a la regla reducir el espesor de la mezcla asfáltica que se coloca sobre los puntos altos de la superficie existente y colocar más mezcla en los puntos bajos de la calzada actual. Esta acción de promediado o nivelación es la base del principio de flotación de las reglas del que se ha hablado anteriormente.

El uso de controles automáticos para pavimentadoras, que se tratan en la sección siguiente, permite a la pavimentadora construir un pavimento más uniforme manteniendo constante la ubicación de los puntos de arrastre de la regla, en relación con una referencia predeterminada, a medida que la unidad tractora se desplaza verticalmente hacia arriba y hacia abajo en respuesta a pequeños cambios en la pendiente de la superficie del pavimento subyacente. Al mantener los puntos de remolque en una relación constante con la referencia predeterminada mientras el tractor se desplaza verticalmente, la fuerza sobre la regla permanece constante y el ángulo de ataque de la regla es coherente con respecto a la referencia. Esto permite a la regla llevar a cabo la acción de nivelación necesaria en una longitud de referencia mayor para reducir la rugosidad de la superficie existente mediante la aplicación de la nueva capa de asfalto.

Desconexión de la regla

La regla de algunas pavimentadoras está equipada con un dispositivo en su borde delantero llamado dispositivo de desconexión (o a veces pre desconexión).

El propósito de este dispositivo es controlar la cantidad de MAC que pasa por debajo de la nariz de la regla, afectando así al ángulo de ataque de la regla. También se utiliza para reducir el desgaste del borde de ataque de la regla. En la Figura 15-15 se ilustra la posición correcta del dispositivo de cierre.

Cuando el tope se fija a la parte delantera de la regla, su posición adquiere importancia en relación con la capacidad de la regla para manipular correctamente la mezcla asfáltica. Si se coloca demasiado alto, como se muestra en la figura, se introduce material adicional bajo la regla, lo que hace que ésta se eleve. El aumento resultante en el espesor de la capa debe superarse reduciendo manualmente el ángulo de ataque de la regla, utilizando las manivelas de control de espesor. Esto a su vez hace que la regla gire alrededor de sus puntos de giro y se adopte un ángulo de ataque ligeramente inclinado hacia abajo. El resultado es un rápido desgaste de la placa frontal de la regla. Además, sólo la parte delantera de la regla está compactando y acabando el material que se está colocando, lo que a menudo da lugar a una textura inconsistente de la capa. Además, la regla se asienta cuando la pavimentadora se detiene entre cargas de mezcla, ya que el peso de la regla recae únicamente sobre su parte delantera.

Por otra parte, si el ángulo de ataque es demasiado bajo, el espesor de la capa se reduce porque no pasa suficiente MAC por debajo de la regla. Para mantener el grosor adecuado de la capa, el ángulo de ataque de la regla debe modificarse, lo que provoca que este se incline hacia arriba en la parte delantera. Esto aumenta el desgaste en el borde posterior de la regla y reduce el esfuerzo de compactación aplicado por la regla. También hace que la regla se asiente cada vez que se detiene la pavimentadora debido a la concentración del peso de la regla en una superficie más pequeña. El lugar exacto del desprendimiento depende de la marca y el modelo de extendedora que se utilice y de la profundidad de la capa colocada por la pavimentadora. Para capas relativamente finas de pavimento [25 mm (1 pulg.) de espesor o menos], la separación suele situarse más abajo que cuando se colocan capas más gruesas de mezcla. Del mismo modo, para capas gruesas de pavimento asfáltico [superiores a 50 mm (2 pulg.)], el conjunto de arranque suele elevarse ligeramente por encima de la posición normal. En general, el dispositivo de arranque se sitúa entre 5 y 13 mm (3⁄16 a 1⁄2 pulg.) por encima del plano de la placa de la regla principal. No se produce compactación de la mezcla bajo la barra niveladora.

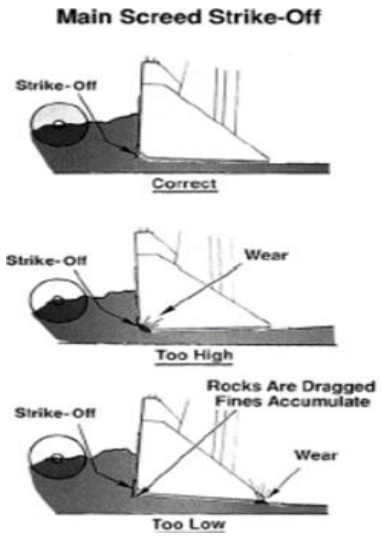


FIGURA 15-15 Colocación correcta del conjunto de cierre.

Calentadores de la regla

La regla está equipada con dos o más calentadores o quemadores, dependiendo de la edad y el modelo de la pavimentadora. El objetivo de los calentadores es precalentar la placa situada en el extremo inferior de la regla a la temperatura de la capa de hormigón que se está pavimentando. La regla debe calentarse antes de iniciar las operaciones de pavimentación y en cualquier momento en que la regla haya estado fuera de la mezcla durante un período prolongado. La regla debe estar casi a la misma temperatura que el material asfáltico que pasa por debajo de ella para garantizar que la mezcla no se pegue a la placa de la regla y se desgarre, dando una textura rugosa a la capa. Una regla calentada adecuadamente proporciona una textura superficial más uniforme y un grosor más consistente.

Para precalentar la regla, los quemadores se ponen en marcha normalmente durante un período de 10 a 20 minutos antes de que comience la operación de extendido. Se debe tener cuidado para evitar el sobrecalentamiento, que puede causar la deformación permanente de la placa de la regla. En la actualidad se utilizan a veces calentadores eléctricos de la regla, que suelen proporcionar un calentamiento más uniforme de la misma. Por lo general, a los 10 minutos de iniciarse el extendido, la temperatura de la plancha de la regla ha aumentado hasta un punto en el que, por lo general, puede mantenerse con la temperatura de la mezcla que pasa por debajo de ella. Por tanto, los quemadores no son necesarios y se apagan. Un gran error es creer que los calentadores pueden utilizarse para calentar el material frío que pasa por debajo de la regla. Esto no es cierto: en el mejor de los casos, sólo se calienta ligeramente la superficie superior de la mezcla, mientras que la parte inferior de la regla puede sobrecalentarse hasta el punto de deformarse. Por las mismas razones, los calentadores de la regla no deben usarse en un

intento de aumentar la temperatura de la mezcla que se encuentra debajo de la regla durante un período de tiempo mientras se espera la llegada del siguiente camión de acarreo.

En tiempo frío - durante el arranque cuando la planta está fría, las plataformas de los camiones de acarreo están frías y el metal de la pavimentadora está frío- a veces es ventajoso comenzar a pavimentar con el segundo o tercer camión de mezcla entregado a la pavimentadora, en lugar de la primera carga producida y entregada. Esta segunda o tercera carga de mezcla suele tener una temperatura más alta que la primera y, por tanto, servirá para calentar más la extendedora y reducir la cantidad de desgarros que podrían producirse bajo la regla. Colocar primero el segundo o tercer camión de mezcla puede proporcionar una textura superficial más uniforme cuando la pavimentación debe realizarse a temperaturas ambiente más bajas.

Control de la corona de la regla

La regla puede inclinarse en su centro para proporcionar una corona positiva o negativa. La cantidad de corona que puede introducirse en la regla varía según el ancho de la regla y con la marca y el modelo del equipo.

La corona se ajusta normalmente utilizando un tensor de tornillo para flexionar la parte inferior de la regla e impartir el grado de corona deseado. Cuando se utilizan pavimentaciones rígidas junto con la regla, la corona colocada en el pavimento por la pavimentadora también puede modificarse en cualquiera de los puntos en los que se unen las extensiones. Si se utiliza una regla extensible hidráulicamente con la pavimentadora, la corona puede introducirse no sólo en el centro de la regla, sino también en los puntos situados entre la regla y las extensiones hidráulicas. La mayoría de los fabricantes de pavimentadoras recomiendan que la regla se deforme ligeramente, de delante hacia atrás en su centro, para facilitar el paso del aglomerado bajo la regla y obtener una textura más uniforme en la capa asfáltica. Este proceso consiste en colocar la corona delantera de la regla ligeramente por encima de la corona trasera de la regla. En general, debe haber más corona delantera que trasera, pero la cantidad de diferencia depende de la marca de la pavimentadora y del tipo de regla. Normalmente el ajuste de la corona de plomo es de 1 a 5 mm (1⁄32 a 3⁄16 pulg.) mayor que el ajuste de la corona de cola, siendo 3 mm (1/8 pulg.) la diferencia media entre los ajustes de la corona.

En el caso de las reglas pavimentadoras hidráulicamente, que se describen más adelante, algunos fabricantes de pavimentadoras no recomiendan colocar ninguna cantidad de corona de plomo en el borde delantero de la regla. Debido a las diferencias en las recomendaciones para diferentes marcas y modelos de pavimentadores, se sugiere consultar el manual de instrucciones del fabricante antes de colocar la corona en la regla.

Vibradores de regla

La cantidad de compactación que la regla imparte a la mezcla asfáltica depende de muchas variables. Las propiedades de la mezcla en sí son importantes: su rigidez, su temperatura y la cantidad de cemento asfáltico y humedad que contiene afectan a la capacidad de la regla para densificar la mezcla. El grado de compactación alcanzado también se ve afectado por la presión ejercida por la regla sobre la mezcla, así como por el grosor de la MAC que pasa por debajo de la regla.

Dos factores de la propia regla también contribuyen al grado de compactación alcanzado - la frecuencia de vibración (número de vibraciones por minuto) y la amplitud (cantidad de fuerza) impartida por la regla. La frecuencia de vibración se controla mediante la velocidad de giro del eje vibrador y se ajusta girando una válvula de control situada en la regla. El aumento de las revoluciones por minuto del eje incrementará la frecuencia de la vibración y, por tanto, el esfuerzo de compactación. En general, los vibradores deben utilizarse con el ajuste de frecuencia más alto para obtener el máximo esfuerzo de compactación de la regla.

La amplitud aplicada viene determinada por la ubicación de las pesas excéntricas en el eje. La posición de los pesos excéntricos puede modificarse para aumentar o disminuir la cantidad de esfuerzo de compactación aplicado a la mezcla por la regla, como se ilustra en la Figura 15-16. Normalmente, el ajuste de amplitud seleccionado está relacionado con el espesor de la capa que se está colocando: menor amplitud para capas más finas y mayor amplitud para capas más gruesas.

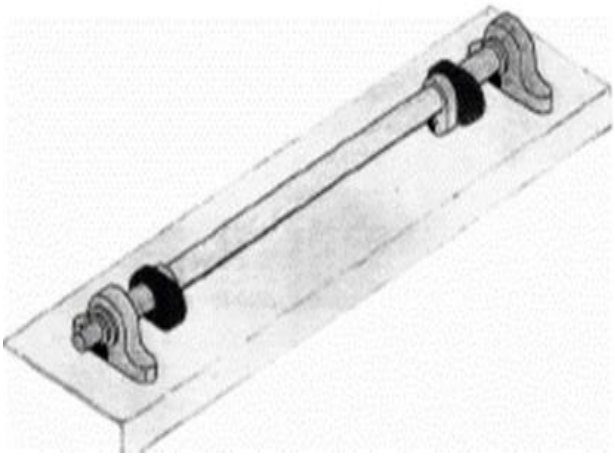


FIGURA 15-16 Eje de vibración de la regla con pesos

La densidad alcanzada por la regla pavimentadora también depende de la velocidad de la pavimentadora. A medida que la pavimentadora se mueve más deprisa, la regla permanece menos tiempo sobre cualquier punto concreto de la nueva capa y, por tanto, disminuye el esfuerzo de compactación aplicado por la regla. Cabe esperar que se obtenga aproximadamente entre el 75% y el 85% de la densidad máxima teórica de la mezcla cuando ésta salga por debajo de la regla de pavimentación.

En algunos proyectos de pavimentación, la regla no se utiliza en modo vibratorio, sino que se desconecta la vibración. Esto se hace a menudo para que los miembros del equipo de pavimentación puedan caminar por la regla o montar en ella con relativa comodidad; es difícil montar en la regla todo el día si está vibrando. Sin embargo, para aprovechar las ventajas de la regla en la obtención de la densidad de la capa, la regla debe funcionar en modo vibratorio, y los miembros de la cuadrilla deben encontrar otro medio para desplazarse a lo largo de la obra de pavimentación.

Extensiones de regla, zapatas de corte y Placas finales

Extensiones rígidas: Cuando sea necesario modificar el ancho básico de la regla [2,4 m (8 pies) para extendedoras pequeñas y 3,0 m (10 pies) para máquinas más grandes] para adaptarla a anchos de pavimentación mayores, se pueden utilizar extensiones rígidas de la regla, como se ilustra en la Figura 15-17. Estas extensiones vienen en varias anchuras, normalmente 150 mm (6 pulgadas), 0,3 m (1 pie), 0,6 m (2 pies) y 0,9 m (3 pies). Estas extensiones están disponibles en varias anchuras, normalmente 150 mm (6 pulg.), 0,3 m (1 pie), 0,6 m (2 pies) y 0,9 m (3 pies).

FIGURA 15-17 Extensión de la regla rígida.

Para mantener el equilibrio de la pavimentadora, la anchura de las extensiones rígidas añadidas a la regla de extendido debe ser aproximadamente igual a ambos lados de la máquina, si es posible.

Es importante que las extensiones de la regla se fijen firmemente a la regla. Además, es esencial que las extensiones se fijen a la misma elevación y ángulo que la regla para evitar la presencia de una línea de transición o cresta en la intersección de la regla y las extensiones o entre las diferentes extensiones. La alineación del borde delantero de una extensión suele controlarse independientemente de la alineación del borde trasero.

Siempre que se utilice una extensión rígida en la regla, deben utilizarse también las extensiones de sinfín y las extensiones de túnel de sinfín que las acompañan. En general, la longitud de todas las extensiones de la barrena y del túnel debe ser la misma que la de las extensiones de la regla para dejar espacio entre el extremo de la barrena y la placa final de la regla. Normalmente, la distancia entre el extremo de una extensión de barrena y la placa final debe ser de unos 450 mm (18 pulgadas). Además, siempre que se utilicen extensiones rígidas de la regla en una pavimentadora con un dispositivo de corte, también se debe añadir un dispositivo de corte a las extensiones y colocarlo a la misma altura que el dispositivo de corte de la regla.

Extensiones de nivelado: Las extensiones de nivelado se utilizan a menudo para aumentar el ancho de pavimentación en proyectos que no requieren una extensión de regla real con capacidad de compactación por calor y vibración. Dichas extensiones se utilizan para salidas de buzones y para algunos tipos de pavimentación de intersecciones en las que es frecuente encontrar anchos variables. Normalmente, este tipo de extensión consiste simplemente en una cuchilla vertical que corta la mezcla a medida que pasa por debajo de la unidad de corte (véase la Figura 15-18). En algunos casos, se fija una sección muy corta de placa horizontal al conjunto de cierre.

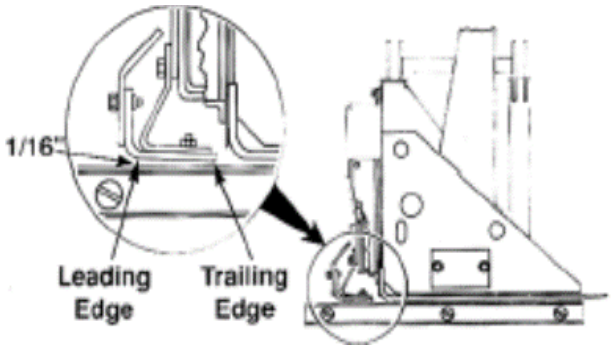


FIGURA 15-18 Extensión de nivelado.

Cuando se instalan y ajustan correctamente, las extensiones de nivelado pueden extenderse y retraerse sin afectar a la capa que se encuentra directamente detrás de la regla. Cuando se extienden estas extensiones de desprendimiento, el MAC colocado por las extensiones debe ser más grueso que el aglomerado que pasa por debajo de la regla, ya que el aglomerado colocado por las extensiones no se compacta igual que el que pasa por debajo de la regla. La diferencia entre los dos espesores debe ajustarse, en función de las propiedades de la mezcla colocada, de modo que tras la compactación por los rodillos no quede ninguna diferencia en el espesor compactado de las dos porciones de la capa. Además, el aglomerado colocado por la extensión de desprendimiento tendrá normalmente una textura significativamente más rugosa que el aglomerado colocado por la regla, como se muestra en la Figura 15-19. A veces, esta diferencia de textura será mayor en el caso de la extensión de desprendimiento que en el de la regla. A veces, esta diferencia de textura permanecerá visible incluso después de que la mezcla se haya compactado.

Se recomienda no utilizar extensiones de nivelado para la pavimentación de la línea principal, de modo que la textura superficial y la compactación del ancho total pavimentado sea uniforme. Así, para un carril típico de 3,7 m (12 pies) de ancho, la regla debería extenderse con extensiones rígidas o con una regla extensible hidráulicamente.

Placas finales y zapatas de corte: Una placa de extremo (o compuerta de extremo o placa de borde) se fija al extremo de la regla para restringir el movimiento hacia afuera de la mezcla alrededor del extremo de la regla, como se muestra en la Figura 15-20. La alineación vertical de la compuerta de extremo es ajustable para que la mezcla pueda eliminarse por debajo de la compuerta si es necesario. La alineación vertical de la compuerta final es ajustable para que la mezcla pueda purgarse por debajo de la compuerta en caso necesario. Sin embargo, en el modo de funcionamiento típico, la placa final se coloca ajustada a la superficie que se está pavimentando para retener la mezcla y controlar el ancho del material que se está colocando.

Si es necesario, se pueden utilizar zapatas de corte para reducir el ancho de la mezcla colocada de modo que sea inferior al ancho de la regla. Las zapatas de corte estándar se fijan a la compuerta del extremo de la pavimentadora. Normalmente, las zapatas de corte vienen en anchos de 0,3 m (1 pie) o 0,6 m (2 pies) y son ajustables en incrementos de 37 mm (1 1⁄2 pulgadas, uno y un medio) o 75 mm (3 pulgadas), dependiendo del fabricante de la pavimentadora.

Reglas extensibles hidráulicamente: La mayoría de los fabricantes de pavimentadoras han desarrollado reglas extensibles hidráulicamente que siguen a la regla principal de la pavimentadora.

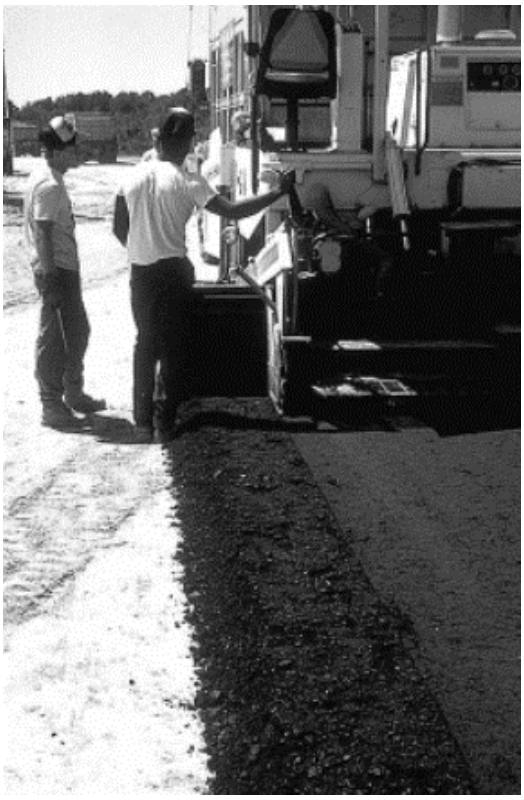


FIGURA 15-19 Diferencia de textura bajo la extensión de la huelga.

Sin embargo, una marca de pavimentadoras está equipada con una regla extensible que coloca la parte extensible de la regla delante de la regla principal. En la Figura 15-21 se muestra un ejemplo de regla extensible.

En todas las reglas extensibles hidráulicamente, es importante que la altura y el ángulo de ataque de las reglas extensibles (a cada lado de la regla principal) estén bien ajustados. Si las extensiones de la parte extensible de la regla no están correctamente alineadas con la regla principal, se producirá una marca o cresta longitudinal en la superficie de la mezcla en la unión entre las dos reglas, lo que indicará una diferencia de grosor.

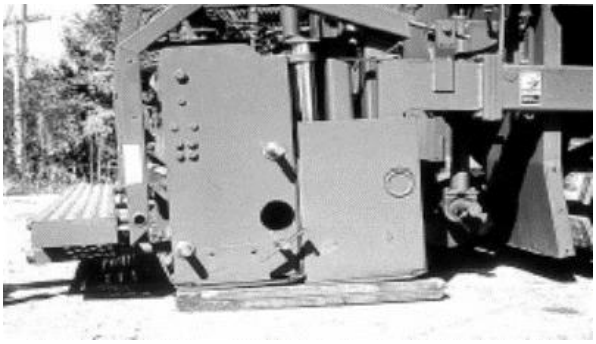


FIGURA 15-20 Placa final en la pavimentadora.

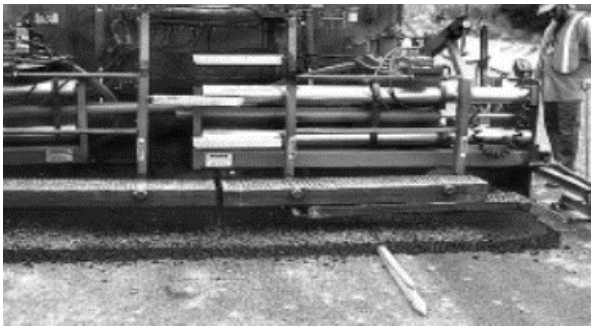


FIGURA 15-21 Regla extensible hidráulicamente.

Esta marca puede eliminarse fácilmente ajustando la elevación de la regla extensible en relación con la de la regla principal. Además de la marca longitudinal, un desajuste en la elevación entre las dos reglas puede provocar una diferencia en la textura de la superficie, así como una diferencia en el grado de compactación obtenido. En el caso de las extensiones montadas en la parte delantera, la regla extensible suele colocarse a una altura ligeramente inferior a la regla principal. En el caso de las extensiones montadas en la parte trasera, la altura de la parte extensible de la regla suele fijarse a la misma altura que la regla principal, pero las extensiones suelen tener un ángulo de ataque ligeramente más positivo que la regla principal. En general, sin embargo, las fuerzas que actúan sobre las reglas extensibles y la regla principal son similares. Además, si se utiliza un dispositivo de desconexión en la regla principal, deberán utilizarse dispositivos de desconexión similares en las secciones extensibles de la regla.

Si se va a utilizar una regla extensible hidráulicamente montada en la parte delantera a una anchura extendida fija durante un período de tiempo, la pavimentadora debe estar equipada con extensiones de sinfín iguales a la anchura de la regla extendida y que terminen aproximadamente a 450 mm (18 pulg.) de la placa final. El uso de estas extensiones del sinfín mejorará la distribución de la mezcla asfáltica a lo largo del ancho que se está pavimentando y ayudará a mantener una cabeza constante de material empujando sobre el ancho total de la regla. Las extensiones del túnel del sinfín también deben añadirse a la pavimentadora.

En el caso de las pavimentadoras equipadas con una regla extensible hidráulicamente montada en la parte trasera, a menudo no se emplean extensiones del sinfín, incluso cuando la regla se va a utilizar un ancho extendida fijo durante un período de tiempo. Si se utilizan extensiones de sinfín en este tipo de extendedoras, puede acumularse un exceso de mezcla delante de las extensiones de la regla, como se muestra en la Figura 15-22. Esta situación puede provocar varios problemas en el extendido. Esta condición puede dar lugar a varios problemas con la capa detrás de la regla, tal como textura no uniforme y grueso variable de la capa, y por lo tanto no se debe permitir que ocurra. Con las extensiones montadas en la parte trasera, el material

FIGURA 15-22 Acumulación de exceso de mezcla delante de la regla extendida.

MAC fluirá de forma natural hasta el final de la regla sin la ayuda de las pavimentaciones del sinfín. Además, sin extensiones de sinfín, normalmente se transportará menos mezcla delante de la sección extensible de la regla. Para las extensiones montadas en la parte trasera, los sensores de alimentación de material deben montarse en la compuerta final de la regla para limitar la cantidad de mezcla transportada delante de la parte extensible de la regla.

Si se va a emplear una regla extensible hidráulicamente - especialmente una extensión montada en la parte delantera - en lugares donde el ancho que se va a pavimentar cambia con frecuencia, algunos fabricantes de pavimentadoras recomiendan que la maquinaria esté equipada con paletas o sinfines de expulsión en el extremo del sinfín principal. Este dispositivo ayuda a empujar la mezcla hacia el extremo de la regla extensible y mantiene la cabeza de material delante de la regla lo más constante posible. Otras pavimentadoras están equipadas con sinfines que se extienden automáticamente a medida que se extiende la regla.

En cualquiera de los dos tipos de pavimentadoras, los sensores de alimentación de material deben montarse en la compuerta final de la regla para garantizar que se suministra una cantidad adecuada de material al borde exterior de la regla.

RESUMEN

Los siguientes factores clave deben tenerse en cuenta a la hora de supervisar las operaciones de colocación del aglomerado:

- Si la mezcla se entrega mediante un camión de transporte que lo vierte directamente en la tolva de la pavimentadora, el camión debe detenerse justo antes de la pavimentadora. La pavimentadora debe moverse hacia delante cuando entre en contacto con el camión; la pavimentadora debe recoger al camión en lugar de que el camión retroceda hacia la

pavimentadora. Cuando esté levantada, la plataforma del camión no debe descansar sobre ninguna parte de la pavimentadora.

- Antes de abrir la compuerta trasera del camión de transporte para entregar la mezcla a la tolva de la pavimentadora, la plataforma del camión debe elevarse lentamente hasta que la mezcla de la plataforma se mueva contra la compuerta trasera. Este procedimiento permite que la mezcla se mueva en masa hacia la tolva de la pavimentadora cuando se abre el portón trasero y reduce la cantidad de segregación detrás de la regla. Si la palanca de apertura de la compuerta trasera no se puede alcanzar cuando la plataforma del camión está levantada, se debe modificar para permitir la operación desde el nivel del suelo cuando la caja está levantada.
- Si se utiliza un elevador de hileras para recoger mezcla de una hilera en la calzada y entregarla a la tolva de la pavimentadora, los transportadores de láminas deben recoger esencialmente toda la mezcla que se encuentra en la hilera, sin dejar nada sobre la superficie existente. Para la colocación de una capa de nivelación, puede ser necesario dejar una cantidad mínima de mezcla en la superficie del pavimento bajo el elevador de la hilera debido a la irregularidad de la superficie del pavimento existente.
- La hilera debe dimensionarse de modo que la cantidad de mezcla en la tolva de la pavimentadora esté siempre por encima de la parte superior de las compuertas de flujo o de las aberturas del túnel.
- Cuando una pavimentadora deba detenerse para esperar a los camiones, deberá hacerlo con la mayor rapidez y suavidad posibles. En la tolva de la pavimentadora deberá quedar mezcla suficiente para que, como mínimo, esté al nivel de la parte superior de las compuertas de flujo o de las aberturas del túnel. En ningún caso deberá vaciarse la tolva hasta el punto de que queden visibles los transportadores de láminas situados en la parte inferior de la tolva. Los transportadores de listones tampoco deben estar nunca a la vista cuando se utilice un elevador de hileras o un MTV para suministrar mezcla a la tolva de la pavimentadora. La cantidad de mezcla en la tolva debe ser constante para que la cabeza de material delante de la regla de pavimentación se mantenga constante.
- Cuando se detiene la pavimentadora para permitir que el siguiente camión cargado de mezcla se desplace a su posición, se pueden plegar las alas de la pavimentadora, pero sólo cuando sea necesario para evitar la acumulación de mezcla fría en las esquinas de la tolva. Las alas no deben golpearse repetidamente mientras se vacían. Las alas deben vaciarse en una tolva de pavimentadora relativamente llena: la cantidad de MAC en la tolva debe estar por encima de la parte superior de las compuertas de flujo o de las aberturas del túnel cuando se vacíen las alas. El vertido de las alas en una tolva relativamente llena puede dar lugar a que se derrame algo de mezcla por la parte delantera de la tolva; deberán utilizarse protecciones contra el desbordamiento para contener la mayor cantidad posible de mezcla.
- Una vez que se ha empezado a vaciar un nuevo camión de mezcla en la tolva, la pavimentadora debe ponerse a la velocidad de pavimentado lo más rápidamente posible y funcionar a una velocidad constante de acuerdo con la cantidad de mezcla que se esté suministrando desde la planta. Esta práctica mantendrá el material de cabeza delante de la regla lo más constante posible.
- La pavimentadora no debe funcionar a una velocidad inferior a la normal mientras se realiza el intercambio de camiones. Si la pavimentadora sigue avanzando mientras un camión sale y el siguiente se desplaza a la posición de entrega, la cantidad de mezcla en la tolva se reducirá, posiblemente hasta el punto de que la tolva se vacíe. Este procedimiento hará que se reduzca la cantidad de mezcla en los sinfines, lo que a su vez hará que disminuya el ángulo de ataque de la regla y, por tanto, el espesor de la capa. La reducción de la velocidad de la pavimentadora de la velocidad normal de pavimentación a la velocidad de arrastre entre cargas de camión también modificará las fuerzas que actúan sobre la regla/solado, alterando aún más el espesor de la capa de asfalto. Además, cuando la mezcla recién entregada se vacía en la tolva y los transportadores de tablillas la arrastran de vuelta a los sinfines, la gran masa de mezcla (cabeza de material) contra la regla hará que ésta se eleve, aumentando el espesor de la capa. Por lo tanto, debe evitarse reducir la velocidad de la pavimentadora entre cargas de mezcla mientras se vacía la tolva, ya que se producen cambios significativos en las fuerzas que actúan sobre la regla y los consiguientes cambios en el espesor de la capa que se está construyendo.
- Las compuertas de flujo situadas a cada lado de la máquina, en la parte posterior de la tolva de la pavimentadora, deben colocarse a una altura que permita que los transportadores de listones y los sinfines correspondientes funcionen casi el 100% del tiempo posible. La clave para una capa uniforme de mezcla es mantener un nivel constante de material delante de la regla. La clave para un nivel constante del material es una velocidad constante de la pavimentadora y el funcionamiento continuo de los sinfines de la misma.
- Si la pavimentadora está equipada con dispositivos automáticos de control de caudal, dichos

dispositivos deben colocarse cerca de la placa final para mantener una altura constante de mezcla delante de la regla mediante el funcionamiento continuo del sinfín. La ubicación del dispositivo es importante para evitar que se lleve demasiada o muy poca mezcla al borde exterior de la regla.

- Si la regla de pavimentado está siendo operada bajo control manual, el operador de la regla no debe cambiar el ángulo de ataque de la regla girando las manivelas de control de espesor, excepto para aumentar o disminuir el espesor de la capa que se está colocando. Una vez girados los mandos, la regla tardará al menos cinco veces la longitud del brazo de remolque de la pavimentadora en completar el cambio de espesor de entrada. Si la pavimentadora funciona con control automático de pendiente, el operador de la regla no debe intentar cambiar el ángulo de ataque de la regla girando las manivelas de control de espesor.

16 Control automático de la regla

Como se explicó en el apartado 15, la unidad de regla de la pavimentadora está unida a la unidad tractora en un único punto a cada lado de la pavimentadora, denominado punto de remolque (o de tracción). A medida que el tractor sigue la pendiente existente con sus neumáticos de goma u orugas, la longitud de la distancia entre ejes de la pavimentadora se convierte en la referencia para la regla. Debido al tiempo de reacción necesario para la regla, ésta responderá más lentamente a los cambios de pendiente que el tractor. Por lo tanto, con el control manual de la regla (tratado en el apartado 15), la regla compensará las desviaciones en la rugosidad de la capa de pavimento subyacente, colocando más mezcla en los puntos bajos y menos mezcla en los puntos altos del pavimento existente.

Los controles automáticos de la regla se utilizan para mantener la elevación de los puntos de remolque del pavimentado a una cota predeterminada con respecto a la referencia (ya sea una línea de cuerda preestablecida o un esquí móvil largo). Las desviaciones en la superficie del pavimento se promedian sobre la longitud de la referencia. A medida que la unidad tractora se desplaza hacia arriba y hacia abajo sobre la pendiente existente, la elevación de los puntos de remolque se desplaza en un intervalo menor que el que se produciría si la distancia entre ejes relativamente corta del tractor proporcionara la referencia. Mantener constante la elevación de los puntos de remolque en relación directa con la referencia permite a la regla/solado mantener un ángulo de ataque más constante, lo que a su vez proporciona una capa más uniforme detrás de la regla. No obstante, hay que tener en cuenta que son muchos los factores que influyen en la uniformidad de la mezcla colocada por la pavimentadora. El uso de controles automáticos de la regla no garantiza por sí solo que la capa construida sea uniforme. Es muy importante prestar la debida atención al funcionamiento de la pavimentadora, como se explica en el apartado 15, para obtener una capa de pavimento uniforme.

CONTROL DE REGLA MANUAL VERSUS AUTOMÁTICO

Si la pavimentadora se desplazara siempre sobre una pendiente nivelada, las fuerzas sobre la regla serían constantes siempre que la pavimentadora se moviera a una velocidad constante y hubiera una cabeza constante de material delante de la regla. La fuerza de arrastre de la regla sería estable y la cabeza de material delante de la regla, constante, siempre y cuando el sistema de control de alimentación estuviera ajustado para funcionar la mayor parte del tiempo posible (cerca del 100%). En estas condiciones, se podía obtener una capa de asfalto muy uniforme detrás de la pavimentadora sin que el operador de la regla/solado cambiara nunca el ajuste de las manivelas de control de espesor de la parte trasera de la regla/solado. De hecho, una vez fijado el ángulo de ataque de la regla al arrancar la pavimentadora por la mañana, no era necesario modificar nunca el ajuste de las manivelas de control de espesor.

En el mundo real, sin embargo, la unidad tractora opera sobre una pendiente variable. A medida que la elevación de la superficie existente sube y baja, la distancia entre ejes de la unidad tractora sigue esa pendiente (véase la Sección 15). Este movimiento vertical del tractor a medida que avanza hace que la elevación de los puntos de remolque en el tractor cambie en relación directa con el movimiento de la unidad tractora. Al modificarse la posición de los puntos de remolque, cambia el ángulo de ataque de la regla.

Si se eleva la elevación de los puntos de remolque, la regla/solado girará hacia arriba en relación con el cambio de elevación de los puntos de remolque. A medida que la pavimentadora avanza una distancia igual, como mínimo, a cinco veces la longitud de los brazos de nivelación o de remolque de la máquina, la regla flotará hasta la nueva elevación, y la capa de asfalto colocada será más gruesa. Si el tractor se desplaza hacia un desnivel de la calzada existente, la elevación de los puntos de remolque disminuirá, reduciendo el ángulo de ataque de la regla/solado. Si no se produce ningún otro cambio en las fuerzas que actúan sobre la regla, ésta se desplazará hacia abajo a medida que avance la pavimentadora, reduciendo el espesor de la capa extendida.

La acción autonivelante de la regla se produce continuamente a medida que la unidad tractora se desplaza sobre la calzada. El grosor de la capa se determina por la reacción de la regla a la ubicación de los puntos de remolque, la velocidad del tractor y la carga de material en la cámara del sinfín. Toda la operación se realiza sin cambiar nunca las manivelas de control de espesor de la regla. El principio de la regla flotante permite a la pavimentadora reducir el espesor de la mezcla colocada en los puntos altos de la superficie del firme existente y aumentar la profundidad del material depositado en los puntos bajos.

Si el operador de la regla gira las manivelas de control de espesor, la regla reaccionará (cambiará su ángulo de ataque) girando alrededor de los

puntos de articulación o pivote donde está unida a los brazos niveladores y, por tanto, a los puntos de remolque de la regla. A medida que la pavimentadora se desplaza hacia delante, la regla flotará hacia arriba o hacia abajo hasta la nueva elevación. Al igual que con un cambio en la elevación de los puntos de remolque de los brazos niveladores, la pavimentadora debe desplazarse hacia delante una distancia de al menos cinco longitudes de los brazos niveladores antes de que el cambio en la profundidad de la capa se produzca por completo.

En muchos proyectos, particularmente aquellos que implican el repavimentado de un pavimento existente, el operario de la regla se ve obligado por las especificaciones del trabajo a mantener un determinado rendimiento de mezcla asfáltica por yarda cuadrada o por estación. No es raro ver al operador de la regla comprobar continuamente el espesor de la capa que está colocando la extendedora y ajustar la configuración de las manivelas de control de espesor para aumentar o disminuir la cantidad de mezcla que se está colocando. Estos cambios en la configuración del sistema de control de espesor se realizan sin tener en cuenta los cambios simultáneos en la regla a medida que cambia la elevación de los puntos de remolque mientras la unidad tractora avanza sobre la pendiente variable.

Por lo tanto, el sistema de auto nivelación recibe dos datos al mismo tiempo. La primera es el movimiento vertical de los puntos de remolque de la regla como reacción a los cambios en el movimiento de la distancia entre ejes de la pavimentadora.

El segundo es el cambio manual de las manivelas de control de espesor por parte del operador de la regla, ilustrado en la figura 16-1. Estas dos entradas pueden ir en la misma dirección o en direcciones opuestas, e incluso anularse mutuamente.

En el funcionamiento manual de la regla, la capacidad del operador de la regla para producir una capa de asfalto uniformemente lisa depende de varios factores. El primero es la frecuencia con la que el operario ajusta la posición de las manivelas de control del espesor/capa: cuanto más cambie el ángulo de ataque de la regla, más irregular será el pavimento resultante. El segundo factor es la rugosidad de la superficie del pavimento existente: cuanto más intente el operador de la regla ayudar a la acción autonivelante de la regla, más rugosa será la superficie del pavimento resultante.

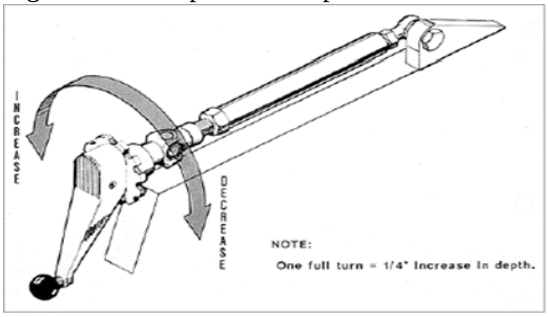


FIGURA 16-1 Manivela de control de espesor.

En tercer lugar, es necesario cumplir una determinada especificación de rendimiento máximo. Es difícil, sobre todo en el caso de capas finas, producir una capa de pavimento uniforme sin sobrepasar un determinado volumen de material utilizado. Este es el caso, en particular, si se especifica un espesor mínimo de recubrimiento junto con los criterios de rendimiento. Este problema se trata en detalle más adelante en esta sección. El cuarto factor está relacionado con la necesidad del operador de la regla de igualar la elevación de la junta longitudinal en el carril adyacente. A medida que ha aumentado la velocidad de extendido debido a la mayor producción de la planta, se ha hecho más difícil mantener manualmente el nivel de la nueva capa en relación con la capa adyacente.

Cuando se desea producir una pendiente transversal constante en toda la anchura del carril que se está pavimentando, se pueden utilizar controles automáticos de pendiente y nivelación para controlar la elevación de los puntos de remolque de la regla/solado en ambos lados de la extendedora al mismo tiempo. Esto es muy difícil de hacer manualmente, incluso con dos operadores de regla experimentados.

Se puede utilizar un control de rasante en ambos lados de la máquina; lo más habitual es utilizar un control de rasante en un lado de la pavimentadora y un control de pendiente en el otro.

El objetivo principal de los controles automáticos de la regla es producir una capa de pavimento asfáltico más lisa que la que puede conseguir la extendedora por sí misma utilizando únicamente la distancia entre ejes de la unidad tractora y la regla de flotación libre, y más lisa que la que puede conseguir un operario de la regla/solado cambiando continuamente el ajuste de las manivelas de control del espesor. Como se ha señalado, los controles automáticos de la regla funcionan manteniendo la elevación de los puntos de remolque de la regla en relación con una referencia distinta de la distancia entre ejes de la propia pavimentadora. Esta referencia suele ser más larga que la distancia entre ejes del tractor. La Figura 16-2 ilustra una regla y un esquí acoplado.

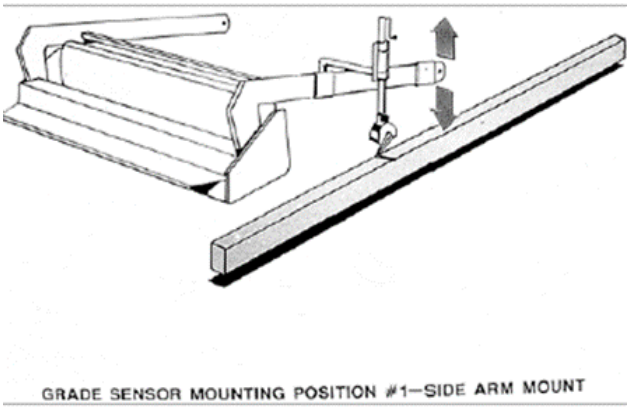


FIGURA 16-2 Regla y esquí fijado.

La elevación de los puntos de remolque se mantiene constante con respecto a una referencia de pendiente dada. El sistema automático no permite que cambie la posición relativa de los puntos de remolque, aunque la unidad tractora se mueva verticalmente hacia arriba y hacia abajo en respuesta a la rugosidad de la superficie por la que se desplaza. Al mantener los puntos de remolque a una elevación constante, el ángulo de ataque de la regla también se mantiene constante. Esto permite que la regla se desplace a un ángulo constante, lo que le permite realizar un trabajo aún mejor al reducir la cantidad de mezcla colocada sobre los puntos altos de la superficie del pavimento existente y aumentar la cantidad de mezcla colocada en los puntos bajos.

Antes de conectar el control automático de la regla y de iniciar el extendido, la regla/solado debe "anularse" (es decir, el ángulo de ataque debe fijarse en una posición plana o de ángulo cero). Una vez que la extendedora esté en movimiento, deberá ajustarse el ángulo de ataque adecuado para el espesor que se esté extendiendo y conectarse el control. Si se utilizan controles automáticos en la extendedora, el operador de la regla no debe intentar cambiar manualmente el ángulo de ataque de la regla/solado girando las manivelas de control de espesor. Si se hace tal intento mientras la máquina está en movimiento, los controles automáticos de nivelación e inclinación intentarán compensar la entrada manual cambiando la elevación de los puntos de remolque. La intervención manual sólo será necesaria si el actuador del punto de remolque (cilindro hidráulico) ha alcanzado el límite de su recorrido, es decir, si el cilindro del punto de remolque está en su límite superior o inferior. En este caso, la pavimentadora debe detenerse y el brazo de arrastre debe volver a colocarse en el punto central de su recorrido. La regla/solado debe anularse, la pavimentadora debe volver a ponerse en marcha y debe introducirse el ángulo de ataque adecuado en la regla/solado antes de continuar con el extendido/pavimentación.

Tenga en cuenta que cuando se pavimenta una curva peraltada que requiere un cambio de la pendiente transversal existente, es necesario hacer funcionar el sensor de nivel en un lado de la pavimentadora automáticamente y el sensor de pendiente en el otro lado de la pavimentadora manualmente. Esta práctica permite realizar cambios en la cantidad de peralte y proporciona el grado requerido de pendiente transversal.

CONTROL DE CALIFICACIONES

Tipos de referencias de grado

Los sensores de nivelación se utilizan para controlar la elevación de la superficie del firme existente en dirección longitudinal. Para mantener la elevación de los puntos de remolque de la regla pueden utilizarse tres tipos básicos de referencias de rasante: (a) cordel erguido, (b) referencia móvil o esquí, y (c) zapata de coincidencia de juntas. En algunos proyectos de pavimentación con una distancia visual adecuada, como una pista de aterrizaje de un aeropuerto o una plataforma de pruebas para vehículos de gran tamaño, también puede utilizarse un sistema láser.

Cada tipo de referencia de nivelación puede utilizarse solo en cualquiera de los lados de la pavimentadora; también puede utilizarse en ambos lados de la pavimentadora al mismo tiempo. Se puede utilizar el mismo tipo de referencia de rasante en ambos lados de la máquina, o se puede montar un tipo diferente en cada lado. Por ejemplo, se puede utilizar un alambre conductor preestablecido en un lado y una referencia móvil en el otro. La utilización de referencias de doble nivel permite compensar las variaciones del perfil del firme existente a ambos lados del carril que se está pavimentando. Sin embargo, la utilización de referencias de doble rasante no suele producir una pendiente transversal uniforme para la nueva capa de asfalto, a menos que se utilice un cordel preestablecido a ambos lados de la máquina de extendido. Un enfoque eficaz consiste en combinar el uso de controles de rasante y pendiente. Cuando se utiliza una referencia de nivel junto con un dispositivo de control de la pendiente, el sensor de nivel se coloca normalmente en el lado de la línea central de la pavimentadora, mientras que el control de la pendiente determina la profundidad de la capa en el borde exterior del pavimento.

El sensor de grado o la varilla está en contacto con la referencia en todos los sistemas excepto en el sónico. A medida que cambia la pendiente de la referencia, la varilla detecta el cambio y envía una señal eléctrica al panel de control de la pavimentadora. A continuación, se envía una señal, a su vez, a los puntos de remolque situados a ambos lados de la pavimentadora, y su elevación se modifica en relación con el cambio detectado por el sensor de grado.

Si se utiliza un sistema sónico o sin contacto, se envía un impulso sonoro desde un transductor hacia la referencia: alambre conductor, referencia móvil o superficie de pavimento existente.

Cuando el impulso acústico llega a la referencia, una parte del mismo se refleja en el transductor, que también actúa como receptor. Se mide el tiempo que tarda el sonido en llegar a la referencia y volver, y se calcula la distancia en función de la velocidad del sonido. De este modo, la elevación de los puntos de remolque se controla sin que el sensor entre en contacto con la referencia. En un sistema sónico, se utiliza una "ventana de trabajo" para evitar que el sistema realice un cambio importante en la elevación de los puntos de remolque cuando se recibe una señal falsa.

Esta ventana es de más o menos 61 mm (2,4 pulg.) desde la elevación de la referencia. Si la distancia medida por el sistema sónico es mayor que el rango de la ventana, el control del sensor de nivelación pasa a manual y no se envía ningún cambio a los puntos de remolque

Cordel erguido

El uso de un cordel erguido, que se muestra en la Figura 16-3, permite colocar la capa de asfalto más lisa posible detrás de la regla de extendido. El cordel puede ser de alambre o de cuerda de nailon. Este método de suministro de datos de elevación proporciona la referencia más coherente para los puntos de remolque de la pavimentadora, lo que permite igualar con gran precisión una pendiente predeterminada si los controles se utilizan correctamente.

En la aplicación, el uso de un alambre conductor erguido presenta una serie de inconvenientes que pueden contrarrestar la mayor uniformidad obtenida. En primer lugar, la elevación del alambre conductor erguido debe ser fijada por un equipo de topografía. La precisión de la elevación de la línea y la suavidad del pavimento resultante dependen directamente del cuidado que se tenga durante la instalación. Si la graduación establecida por los topógrafos es incorrecta en algún aspecto, la regla pavimentadora duplicará ese error en la superficie del pavimento. En curvas horizontales, es muy difícil utilizar un alambre conductor para controlar la pendiente de la nueva capa de pavimentado. Dado que el cordel no puede colocarse en una curva, debe utilizarse una serie de acordes para simular el radio de la curva. Esto requiere a su vez la colocación de un gran número de postes y varillas de soporte, normalmente a intervalos de 1,5 a 6,0 mm (5 to 20 pies), alrededor de la curva.

El cordel también debe estar muy tenso cuando se coloca. Normalmente, el cordel se apoya a intervalos de 8 m (25 pies) en postes y varillas metálicas. El cordel o alambre se ancla primero en un extremo de su longitud y luego se tensa y ancla en el otro extremo. Es muy importante que no haya depresiones entre las varillas de soporte. Si el cordel no está bien tensado, el sensor de la pavimentadora, que puede ir por encima o por debajo del cordel, reaccionará a las deformaciones del cordel y las reproducirá en la superficie del nuevo pavimento. Incluso cuando se utiliza una línea de alta resistencia, no siempre es posible mantener la línea lo suficientemente tensa como para evitar que se produzcan pequeñas deformaciones.

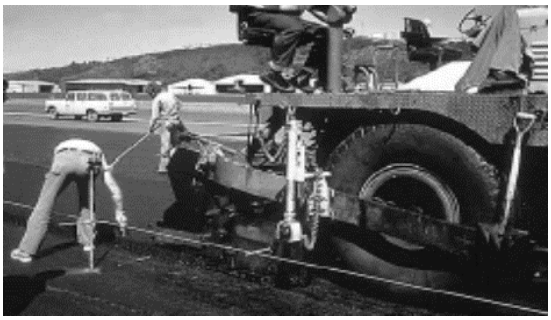


FIGURA 16-3 Cordel erguido para control de rasante.

Debe tenerse en cuenta que las depresiones del alambre conductor no se duplicarán exactamente en el mismo punto longitudinal de la superficie del pavimento debido al retardo en el tiempo de reacción de la regla una vez que se ha efectuado una entrada en la elevación de los puntos de remolque (véase el apartado 15). A medida que el sensor de nivelación se desplaza sobre el alambre conductor, la elevación de los puntos de remolque cambia. Sin embargo, la pavimentadora debe recorrer una distancia igual a cinco veces la longitud del brazo de arrastre antes de que se complete el cambio en el espesor de la capa. Por lo tanto, cualquier hundimiento del alambre conductor se manifestará en la superficie del pavimento, pero a cierta distancia de la calzada desde la posición del hundimiento del alambre conductor.

Otra desventaja del cordel erguido es que los camiones de transporte y todo el personal de pavimentación deben mantenerse alejados del cordel y no alterarlo de ninguna manera. Una vez que el cordel se ha colocado a la altura adecuada, debe permanecer intacto tanto antes como después de que pase el sensor de la pavimentadora por encima del alambre. Cualquier cambio en la elevación del alambre provocará un cambio en la entrada del sensor de nivelación y el movimiento de los puntos de remolque de los brazos niveladores de la pavimentadora.

Con un alambre conductor correctamente colocado y mantenido, la capa colocada por una pavimentadora equipada con controles automáticos de la regla puede ser muy lisa y estar a la elevación correcta, principalmente debido a la mayor longitud de la referencia utilizada en comparación con la longitud más limitada de una referencia móvil. Sin embargo, a menos que la suavidad o el cumplimiento de una referencia de nivel predeterminada sea extremadamente importante, como en el caso de una pista de aterrizaje de un aeropuerto en la que se requiere un perfil longitudinal y transversal uniforme, cabe preguntarse si el gasto adicional que supone la instalación y el mantenimiento de un alambre conductor es rentable para el trabajo típico de extendido de MAC. Por ello, en la gran mayoría de los proyectos de pavimentación de carreteras no se utilizan un cordel erguido.

Referencia móvil

Los distintos fabricantes de pavimentadoras utilizan diferentes tipos de dispositivos de referencia móviles para ampliar la distancia relativa entre ejes del sistema de control automático de la regla. Sin embargo, el funcionamiento de estos sistemas de referencia es básicamente el mismo. El propósito de la referenci

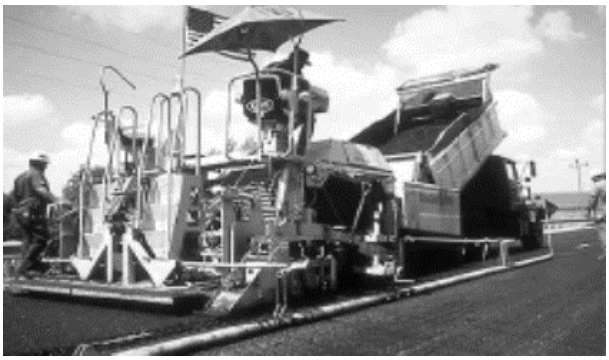


FIGURA 16-4 Pavimentadora con referencia móvil empleando tubería rígida.

móvil es calcular las desviaciones de la superficie del pavimento existente a lo largo de una distancia mayor que la distancia entre ejes de la propia unidad tractora.

Una versión de referencia móvil emplea una referencia de rasante tubular rígida (tubo) de 6,1, 9,1 ó 12,2 m de longitud, como se muestra en la Figura 16-4. En esta versión, el tubo se monta directamente sobre la superficie del pavimento existente. Normalmente se tiende un cable con resorte a lo largo del esquí en la parte superior de la tubería. El sensor de pendiente que envía la señal eléctrica a los puntos de remolque de la pavimentadora se monta encima del cable. A medida que los extremos del tubo se mueven hacia arriba y hacia abajo sobre la rasante existente, el cable estirado sobre la pista se utiliza para promediar las diferencias de elevación que se producen bajo la referencia móvil.

El principal problema que plantea el uso de un tubo rígido o de cualquier referencia rígida es el hecho de que, si existe un punto elevado singular en el pavimento bajo la referencia, el extremo delantero del tubo subirá por encima de la joroba hasta alcanzar el punto medio de la longitud del tubo. En ese momento, el tubo se romperá y su extremo delantero se inclinará hacia abajo, como un balancín. Ese cambio de pendiente continuará hasta que el extremo posterior de la referencia esté fuera del punto alto.

El bache duplicado en la capa de asfalto detrás de la pavimentadora puede ser más pronunciado de lo que habría sido si se hubiera utilizado una referencia de viga flotante. Una referencia móvil de viga flotante consiste en una serie de pies o zapatas fijados a la parte inferior de una viga, como se muestra en la Figura 16-5. Uno o más pies pueden pasar por un punto alto o bajo singular de la superficie del pavimento existente sin alterar la pendiente de toda la viga. Uno o más de los pies pueden pasar sobre un punto alto o bajo singular en la superficie del pavimento existente sin alterar la pendiente de toda la viga. Los pies están accionados por un muelle, por lo que pueden ser desviados por una piedra grande en la superficie del pavimento, por ejemplo, sin empujar toda la viga hacia arriba. El sensor de inclinación suele montarse directamente sobre la viga en su punto medio. Al igual que con los otros tipos de referencias móviles,

FIGURA 16-5 Referencia móvil de haz flotante.

este sistema de viga flotante calcula el promedio de la variación de la pendiente existente en una distancia de 9,1 ó 12,2 m (30 ó 40 pies). En la Figura 16-6 se ilustra otro tipo de sistema de referencia móvil de haz flotante. La viga tiene normalmente una longitud de 9,1 ó 12,2 m (30 ó 40 pies).

Sin embargo, en lugar de múltiples pies repartidos a lo largo de la viga, se coloca una serie de zapatas en cada extremo de la viga. Estas zapatas pueden girar y ser desplazadas individualmente por alteraciones aisladas en la superficie del pavimento existente sin cambiar la elevación de toda la viga. De este modo, la viga puede promediar la pendiente de la superficie en toda la longitud de la referencia sin verse influida por la presencia de un único punto alto o desnivel.

FIGURA 16-6 Referencia móvil de viga flotante con zapatas en los extremos de la viga

En los sistemas de referencia móviles que no sean del tipo de viga flotante, el sensor de rasante deberá estar situado en el centro de la longitud de la viga para garantizar que la entrada de datos a los puntos de remolque de la pavimentadora se realice por igual a lo largo de la longitud de la referencia. Si el sensor de nivel no está situado en el centro de la longitud de la referencia móvil, el esquí no promediará los cambios de elevación en la superficie del pavimento existente de manera uniforme. Como se sugirió anteriormente, el esquí puede considerarse como un balancín, y la ubicación del sensor de nivelación puede considerarse similar al punto de giro del balancín. Si el sensor está desplazado (más cerca de un extremo del esquí que del otro), un cambio de elevación en el extremo más largo de la referencia se magnificará y dará lugar a un mayor cambio de entrada en la elevación de los puntos de remolque. A la inversa, un cambio de elevación en el extremo más corto del esquí dará lugar a un cambio menor en la ubicación de los puntos de remolque de la regla. Por lo tanto, excepto en circunstancias inusuales, el sensor de pendiente debe estar situado en el centro de la longitud del esquí.

Un fabricante de pavimentadoras ha producido un esquí de referencia móvil de 16,8 m (55 pies) de longitud de delante a atrás, denominado referencia sobre la regla (véase la Figura 16-7). En este dispositivo, parte de la viga de referencia está colocada delante de la regla. Esta parte de la referencia es básicamente un sistema de viga flotante, equipada con una serie de zapatas accionadas por resorte, que detecta la pendiente de la superficie del pavimento existente. En la parte trasera de la regla, montada sobre una serie de ruedas accionadas por muelles o grandes zapatas, hay otra viga flotante que se utiliza para referenciar la pendiente de la mezcla asfáltica recién colocada. Para unir las dos partes de la viga flotante se utiliza un conjunto de vigas puente intermedias que se extienden hacia arriba y por encima de la regla. El sensor de rasante se monta en una de las vigas puente intermedias y transmite la rasante media de las vigas delantera y trasera a los puntos de remolque de la pavimentadora para controlar su elevación. Existe otra versión de la referencia sobre la regla. En este dispositivo, el esquí delantero consiste en una viga flotante delante de la regla que se desplaza sobre la superficie del pavimento existente. Otra viga flotante se desplaza sobre el pavimento recién colocado detrás de la regla. Sin embargo, en lugar de las vigas puente que conectan las dos vigas, se utiliza un alambre conductor. El medidor de rasante se desplaza sobre el alambre conductor y detecta el cambio medio de rasante entre las vigas de referencia delantera y trasera.

Debido a su mayor longitud en relación con los otros tipos de referencia, la referencia sobre el esquí proporciona una capa más suave. Sin embargo, además de la mayor longitud de la referencia, el hecho de que el esquí trasero se desplace sobre la nueva mezcla también es importante para la suavidad. Dado que la nueva capa debe ser significativamente más lisa que la superficie del pavimento existente, la variación media detectada por la varilla de nivelación es limitada, lo que resulta en menos cambios en la elevación de los puntos de remolque a medida que la pavimentadora se desplaza por la calzada. Sin embargo, este dispositivo puede no resultar práctico en terrenos accidentados o en pavimentos con un gran número de curvas verticales.

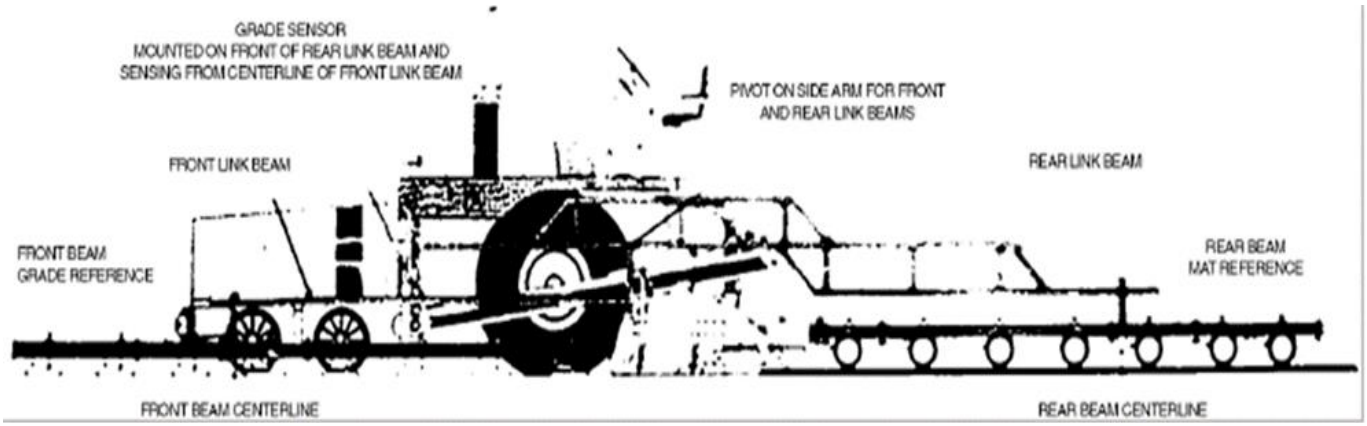


FIGURA 16-7 Referencia sobre la regla

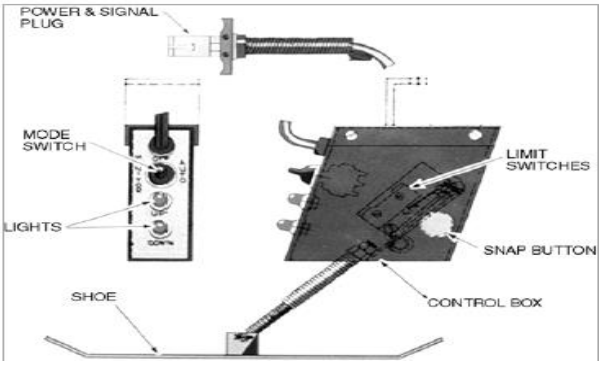


FIGURA 16-8 Zapata para juntas de unión.

Zapata de coincidencia de juntas

La zapata de coincidencia de juntas, mostrada en las Figuras 16-8 y 16-9, consiste en una zapata corta o esquí [aproximadamente 0,3 m (1 pie) de largo] que se utiliza para referenciar la pendiente de un carril de pavimento adyacente. Este tipo de referencia móvil sólo se utiliza cuando la pendiente detectada es relativamente suave. La zapata/zapato gira alrededor de su propio punto de giro y, cuando se desplaza, suministra una señal eléctrica de entrada a los puntos de remolque de la pavimentadora. Debe comprobarse que la zapata gira correctamente. Este tipo de referencia móvil se utiliza sólo cuando la pendiente que se detecta es apropiada.

Debido a su corta longitud, la zapata de coincidencia de juntas no reducirá significativamente las variaciones importantes de la superficie del pavimento. De hecho, el propósito de la zapata es duplicar la pendiente de la superficie adyacente. Este dispositivo de control de rasante debe utilizarse con precaución, ya que los guijarros, rocas y otros obstáculos sobre los que pueda pasar la zapata provocarán cambios de rasante que se introducirán en los puntos de remolque de la regla. Además, debido al retraso en la reacción de la regla una vez que se ha cambiado la elevación del punto de remolque (véase la Sección 15), la entrada de la superficie del pavimento sobre la que pasa la zapata de coincidencia de juntas no se duplicará en la misma ubicación longitudinal en la nueva superficie del pavimento. Por lo tanto, la zapata de coincidencia de juntas no coincide realmente con la junta. Sin embargo, si la zapata se coloca en el punto de remolque, la regla se encuentra aproximadamente 1 longitud de línea de base detrás de la zapata, y el 63% de cualquier cambio de espesor se producirá cuando la regla llegue al punto donde la zapata pidió el cambio.

Al colocar el segundo carril de una capa de base o de una capa intermedia, puede ser mejor utilizar una referencia móvil más larga [un esquí de 9,1 m (30 pies) de longitud] en lugar de una zapata de emparejamiento de juntas.

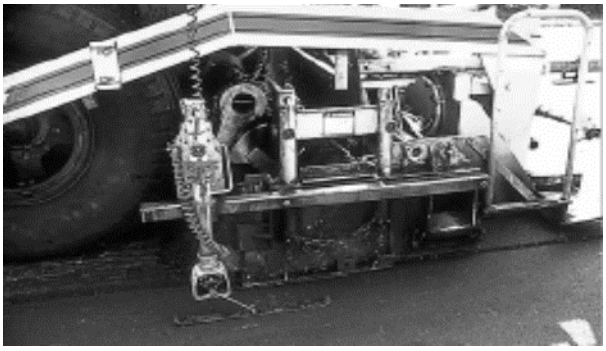


FIGURA 16-9 Funcionamiento de la zapata de unión.

La referencia móvil proporcionará mejor información para la construcción de una superficie de pavimento lisa que la zapata de ajuste de juntas. En el caso de una capa de rodadura, sin embargo, la zapata para juntas puede utilizarse para garantizar que la elevación de la mezcla a ambos lados de la junta longitudinal sea la misma, aunque el uso de una referencia móvil más larga sigue siendo una mejor práctica de pavimentación.

Láser

La tecnología láser se ha utilizado con éxito en numerosos proyectos de pavimentación. En lugares donde la distancia de visibilidad es adecuada y el pavimento que se está colocando tiene una pendiente constante, puede emplearse un sistema láser para controlar la elevación de los puntos de remolque de la pavimentadora. Un transmisor envía una señal láser a una unidad receptora de la extendedora. Esta señal controla la pendiente de la capa regulando la ubicación del punto de remolque en relación con el rayo láser. Si se utiliza correctamente, el sistema de control láser de la pendiente puede proporcionar una capa muy lisa detrás de la pavimentadora. Para evitar que los puntos de remolque se muevan aleatoriamente si un camión de transporte u otro objeto atraviesa el haz láser, el sistema de control incorpora un retardo para que el haz pueda interrumpirse brevemente sin cambiar la posición de los puntos de remolque.

Ubicación de la referencia de nivelación

Los distintos fabricantes de pavimentadoras recomiendan distintas ubicaciones para los sensores de control de rasante. En el pasado, se solía sugerir que el sensor se montara junto al punto de remolque en el lado o los lados de la pavimentadora en los que se utilizaba el control de rasante. Sin embargo, debido al tiempo de reacción retardado de la regla, se ha comprobado que el

mejor lugar para montar el sensor de nivelación es en la parte superior del brazo nivelador de la regla o cerca de la regla/solado. A veces, el sensor de rasante se cuelga en el punto de remolque cuando se utiliza junto con una zapata de igualación de juntas, pero se sugiere que, incluso con este último tipo de referencia, un mejor lugar para situar el sensor es en el brazo de nivelación, a un tercio o dos tercios de la distancia entre el punto de remolque y la regla/solado.

La posición del brazo de remolque o de montaje lateral suele recomendarse cuando es necesario corregir desviaciones verticales largas en la superficie actual del pavimento. Cuando el sensor está situado en el brazo de nivelación, se necesita menos tiempo para reaccionar a los cambios de pendiente y el ángulo de ataque de la regla/solado se modifica rápidamente. En algunos casos, sobre todo en el extendido/pavimentado ancho, es preferible montar el sensor de inclinación cerca o sobre la regla pavimentadora. Para que funcione correctamente, el sensor debe estar situado delante del punto de giro o de articulación de la regla.

La localización del sensor de inclinación influye en la reacción de los puntos de remolque y de la regla/solado a la inclinación detectada. Sin embargo, no existe una regla fija para la ubicación adecuada del sensor de rasante. Por lo tanto, se recomienda utilizar la ubicación sugerida por el fabricante de la pavimentadora. Si no se sugiere ninguna ubicación, se recomienda colgar el sensor en el brazo de nivelación, en un punto entre un tercio y dos tercios de la longitud del brazo entre el punto de remolque y la regla/solado.

El funcionamiento del sensor de control de rasante debe comprobarse periódicamente. La varilla del sensor debe levantarse una distancia muy corta, inferior a 3 mm (1⁄8 pulg.), cuando la máquina está parada y se observa el movimiento de los puntos de remolque. El movimiento manual del sensor debe producir un movimiento correspondiente de los puntos de remolque. Si se sube o baja la varilla y el actuador o el cilindro no se mueven, el sistema está apagado o la sensibilidad del sensor es demasiado alta. En este último caso, el rango de banda muerta o el ajuste de sensibilidad es demasiado grande.

Cuando la pavimentadora está en movimiento, las luces de subida y bajada del sensor de rasante deben parpadear para indicar que se está enviando una señal al actuador del punto de remolque. Si el sensor de nivelación utiliza un medidor en lugar de luces, la lectura del medidor debe cambiar cuando se mueva el sensor, así como cuando la pavimentadora coloque mezcla en la calzada. Además, la elevación de los puntos de remolque debe cambiar ocasionalmente, dependiendo de la rugosidad de la superficie del pavimento existente, de modo que el ángulo de ataque de la regla permanezca constante a medida que la unidad tractora sigue la pendiente del pavimento. Sin embargo, el cambio de elevación de los puntos de remolque debe ser suave. Los puntos de remolque no deben subir y bajar rápida o constantemente a medida que avanza la pavimentadora.

CONTROL DE LA INCLINACIÓN

Como se ha indicado anteriormente, la pavimentación que se realiza con controles automáticos de la regla suele llevarse a cabo con una combinación de control de la rasante en un lado de la pavimentadora y control de la pendiente para determinar la rasante en el otro lado de la máquina. El control de la pendiente funciona mediante un sensor de pendiente situado en una viga transversal entre los dos brazos laterales de la regla/solado.

Un lado de la regla es controlado por el sensor de nivel, mientras que el otro es controlado por el controlador de pendiente. En casi todos los casos, el borde interior o central de la capa se controla mediante la inclinación y el borde exterior mediante la pendiente, ya que es mucho más difícil igualar posteriormente la junta central si se utiliza el control de pendiente en ese lado de la pavimentadora.

Cuando se utiliza el control de pendiente, el espesor de la estera en el lado de la máquina que es controlado por el sensor de pendiente puede ser variable en profundidad, dependiendo de la condición de la superficie del pavimento existente. El grado deseado de pendiente transversal se marca en el controlador de pendiente, como se muestra en la Figura 16-10. Esta pendiente transversal se regula mediante un dispositivo pendular que forma parte del sistema de control de la pendiente.

FIGURA 16-10 Dispositivo de control de pendiente.

FIGURA 16-11 Comprobación de la pendiente de la superficie de la estera detrás de la pavimentadora.

Sin tener en cuenta la pendiente del pavimento existente, el controlador de pendiente mantiene una pendiente transversal constante independientemente del espesor resultante de la capa de asfalto colocada. Si hay un punto alto en la superficie del pavimento actual, el controlador de pendiente hace que la regla deposite menos material sobre ese lugar; si hay un punto bajo en el pavimento existente, el controlador de pendiente hace que la regla/solado deposite más mezcla en ese lugar. Es una buena práctica comprobar rutinariamente la pendiente del carril con un nivel de carpintero u otro método (Figura 16-11). Para un pavimento ancho, como la pista de un aeropuerto, es una buena práctica comprobar la elevación del borde exterior de la mezcla que se está colocando después de dos pasadas de la pavimentadora en dirección longitudinal.

Si la pendiente no se ajusta correctamente o si se cambia accidentalmente el ajuste del sensor de pendiente, el error puede agravarse en el ajuste de la pendiente a lo largo de todo el pavimento. El resultado puede ser una capa de mezcla muy gruesa o muy fina en el borde de la pista. El uso de uno o más alambres conductores a lo largo de un pavimento ancho puede ayudar a obtener la pendiente transversal adecuada.

RENDIMIENTO, ESPESOR MÍNIMO Y CONTROLES DE ESCRUDO

Las especificaciones de pavimentación para los proyectos de recubrimiento con MAC se redactan de diversas maneras. Las especificaciones pueden exigir la colocación de un espesor mínimo de mezcla. En tales casos, suele ser necesario que la pavimentadora coloque un espesor de mezcla mayor que la profundidad mínima requerida en el contrato para que se cumpla la especificación de espesor mínimo en todos los puntos de la capa de pavimento. La cantidad de espesor adicional depende de la rugosidad del pavimento existente: cuanto más irregular sea la superficie a pavimentar, mayor será el volumen de mezcla necesario para garantizar el cumplimiento del requisito de espesor mínimo.

Para ilustrar, si el pavimento existente es relativamente irregular y se requiere un espesor mínimo de recubrimiento de MAC de 25 mm (1 pulg.), el sistema de control de espesor de la pavimentadora debe ajustarse para colocar una profundidad media de HMA sin compactar de aproximadamente 38 mm (1 $^1/_2$ pulg). Esto significa que el ángulo de ataque de la regla debe ser tal que el espesor medio colocado garantice la profundidad mínima de mezcla sobre todos los puntos altos de la superficie del pavimento.

Un segundo tipo de especificación exige la colocación de una cantidad determinada de mezcla, en términos de kilogramos de mezcla por metro cuadrado (libras de mezcla por yarda cuadrada), sobre la superficie del pavimento. En este caso, el requisito de espesor es una profundidad media, no mínima. Si las especificaciones para un proyecto exigen la colocación de 60 kg de mezcla por m2 (aproximadamente 110 lb por yd2) o aproximadamente 25 mm (1 pulg.) de espesor compactado para una mezcla HMA, la regla pavimentadora no necesita colocarse en un ángulo tan grande para colocar la mezcla a una profundidad compactada media de 25 mm (1 pulg.), en comparación con un espesor mínimo de especificación de 25 mm (1 pulg.).

La regla pavimentadora, si se deja operar sin intervención humana en las manivelas de control de espesor y funciona con o sin controles automáticos, normalmente producirá un exceso de mezcla. Esto significa que la pavimentadora necesitará más material del que cabría esperar para reaccionar a las variaciones en la pendiente del pavimento existente y colocar menos mezcla en los puntos altos y más en los bajos. Por lo tanto, para cumplir el requisito de rendimiento, suele ser necesario reducir algo el espesor de la capa que se está colocando, lo que significa que no se cumplirá ningún requisito de espesor mínimo.

Por el contrario, si se deja que la pavimentadora funcione sola, la máquina podrá colocar una capa lisa, pero la cantidad de mezcla necesaria será normalmente superior a la prevista. En este caso, deberá disponerse de una cantidad adicional de mezcla más allá de la calculada a partir de la longitud, anchura y espesor del área del proyecto de pavimentación. Por lo tanto, una operación de este tipo no será práctica para un proyecto con una especificación de rendimiento.

Un problema adicional de la especificación del rendimiento es la distancia longitudinal utilizada para determinar el valor del rendimiento. En algunos casos, el rendimiento se comprueba después de cada carga de mezcla. Esta frecuencia de comprobación suele provocar cambios continuos en las manivelas de control de espesor de la pavimentadora. El rendimiento debería comprobarse sólo periódicamente, por ejemplo, las toneladas de mezcla colocadas en una distancia de 300

m (1.000 pies). Otra opción es comprobar el rendimiento no más de una vez por hora de pavimentación. Un tercer tipo de especificación exige un cierto grado de suavidad para la superficie acabada del pavimento. Existen muchas especificaciones de este tipo. La mayoría están relacionadas con la cantidad de desviación permitida con respecto a una regla de una longitud determinada, o con un cierto número máximo de milímetros (pulgadas) de rugosidad por unidad de longitud, normalmente un kilómetro (milla) o alguna fracción del mismo. Aunque normalmente es posible cumplir tales requisitos de suavidad mediante el uso de controles automáticos de la regla, el éxito final en hacerlo dependerá de la cantidad de mezcla disponible para ser colocada, del estado del pavimento existente y del número de capas de mezcla a colocar. La cantidad de mezcla necesaria para cumplir un requisito de suavidad será normalmente mayor que la cantidad necesaria para cumplir un determinado requisito de rendimiento.

Para la mayoría de las superficies de pavimento existentes, no es razonable esperar conseguir un recubrimiento liso si sólo se coloca una capa de repavimentación. En la mayoría de las superficies de pavimento existentes, no es razonable esperar conseguir un recubrimiento liso si sólo se coloca una capa de repavimentación. De hecho, si la superficie del pavimento existente es bastante rugosa, puede ser difícil cumplir un requisito de lisura incluso después de haber construido dos nuevas capas de mezcla. Por lo tanto, las especificaciones de lisura deben estar relacionadas con el estado de la superficie del firme actual, a menos que la superficie existente esté fresada o que el recubrimiento conste de al menos dos capas.

Un problema importante surge cuando es necesario cumplir simultáneamente algún requisito de rendimiento especificado y un requisito de espesor mínimo o de suavidad. Debido al principio de la regla flotante (ver Sección 15), generalmente no es posible cumplir ambos requisitos al mismo tiempo en el mismo proyecto, dependiendo de la suavidad del pavimento que se está recubriendo. Esto es especialmente cierto en el caso de los recubrimientos finos. El criterio rector (rendimiento, espesor mínimo o lisura) debe determinarse en el momento de diseñar el trabajo y figurar en los documentos contractuales. Ese mismo criterio debe ser discutido y acordado entre el contratista y los representantes de la agencia antes de que comience la pavimentación (durante la reunión previa a la construcción).

RESUMEN

Al supervisar las operaciones de control automático de la regla deben tenerse en cuenta los siguientes factores:

- El operador de la regla no debe intentar realizar cambios manuales en el ángulo de ataque de la regla girando las manivelas de control de espesor, ya que los controles automáticos intentarán cambiar la elevación de los puntos de remolque para compensar la entrada manual en la regla.
- Debe comprobarse que el sensor de inclinación funciona correctamente. Si el vástago (que se desplaza sobre el cordel erguido o la viga de referencia móvil) se eleva 3 mm (1⁄8 pulg.), debe producirse un movimiento correspondiente del actuador o del cilindro en los puntos de remolque de la pavimentadora. Si se eleva (o se baja) el vástago y el actuador no se mueve, o bien el sistema no está encendido o la sensibilidad del sensor está ajustada demasiado amplia, con una banda muerta o un ajuste de sensibilidad demasiado grandes.
- Cuando el sensor está colocado en la referencia de nivel y la pavimentadora avanza, las luces arriba y abajo del sensor deben parpadear ocasionalmente o las luces que parpadean constantemente deben cambiar de intensidad ocasionalmente, tanto arriba como abajo, para indicar que se está enviando una señal desde el sensor al cilindro del punto de remolque. En los sensores de nivelación que utilizan un medidor, éste debe indicar un cambio en la lectura a medida que la pavimentadora se desplaza por la calzada. Además, el movimiento del actuador del punto de remolque debe ser suave, sin movimientos constantes o rápidos hacia arriba y hacia abajo.
- Si se utiliza un cordel o alambre como referencia de nivel, el cordel debe estar muy tenso; no debe haber deformaciones en el cordel, especialmente entre los puntos de apoyo verticales. La tensión puede comprobarse observando la línea. La varilla del sensor de pendiente debe deslizarse fácilmente sobre el cordel erguido y no desplazarse en dirección vertical cuando pase sobre un brazo de soporte. Debe hacerse todo lo posible para evitar que el personal y el equipo entren en contacto con el cordel erguido y lo alteren, tanto longitudinal como verticalmente.
- Si se utiliza una referencia móvil para el control de rasante, el sensor debe montarse sobre la referencia en el punto medio de la longitud de referencia. Esta colocación permite que la entrada de datos a la pavimentadora se realice por igual en toda la longitud de la referencia móvil. Si la referencia móvil está equipada con varios pies o zapatas, deberá comprobarse que cada dispositivo esté limpio y libre para moverse o girar alrededor de su propio punto de articulación o resorte. La longitud de la referencia móvil debe ser tan larga como sea posible para permitir la mayor compensación posible de las variaciones en la elevación de la superficie de la calzada existente. La longitud de la referencia deberá ser superior a la distancia entre ejes del vehículo tractor.

- Si se utiliza una zapata de emparejamiento de juntas para el control de grado, debe comprobarse que es libre de moverse o girar alrededor de su propia bisagra o punto de resorte.
- Si el sistema de control automático incluye el control de la rasante en un lado de la pavimentadora y el control de la pendiente en el otro, la capa que se está colocando debe comprobarse regularmente para asegurarse de que la pavimentadora está incorporando la elevación adecuada en la capa de pavimento. Esta comprobación periódica es especialmente importante en pavimentos muy anchos, como las pistas de un aeropuerto.
- En la mayoría de los proyectos de pavimentación, el sensor de control de rasante debe colgarse en el brazo de nivelación (remolque) de la pavimentadora, normalmente entre un tercio y dos tercios de la distancia entre el punto de remolque y la regla. En algunos proyectos, el sensor puede colocarse justo delante de la regla, pero nunca detrás del punto de giro de la regla. Por lo general, el sensor no debe situarse en el punto de remolque, excepto cuando se utilice junto con una zapata de unión de juntas.

17 Juntas de Pavimento Asfaltico

Durante la construcción de pavimentos de MAC, se encuentran dos tipos de juntas. La primera es una junta transversal, que se construye cada vez que la operación de extendido se interrumpe durante un periodo de tiempo, desde 15 minutos hasta varias semanas o más. La segunda es una junta longitudinal, que se construye cuando un carril de MAC se construye adyacente a un carril de mezcla previamente colocado. Las técnicas para construir cada tipo de junta se tratan en esta sección.

JUNTAS TRANSVERSALES

Suspensión de la pavimentación

La forma de construir una junta transversal depende principalmente de si el tráfico pasará por encima de la mezcla asfáltica antes de reiniciar el extendido. Si el tráfico no va a pasar por encima del extremo del pavimento, puede construirse una junta vertical a tope; en caso contrario, debe construirse una junta cónica. En ambos casos, el funcionamiento de la pavimentadora es esencialmente el mismo, pero la construcción de la junta en sí es diferente.

Es importante que la pavimentadora se desplace con normalidad hasta el punto en que se construya la junta transversal. Esto significa que la altura del material delante de la regla debe ser lo más uniforme posible hasta la junta y en el lugar de ésta, de modo que las fuerzas que actúan sobre la regla sean constantes y se mantenga un ángulo de ataque uniforme para la regla. El resultado será una capa de espesor uniforme en la junta, del mismo grosor que la mezcla colocada anteriormente.

Es una práctica común pero incorrecta vaciar la tolva de la pavimentadora cuando se va a construir una junta transversal. El operador de la pavimentadora vacía la tolva de mezcla y la junta transversal se construye en el punto donde se ha detenido la pavimentadora vacía. Sin embargo, a medida que se vacía la tolva, la cantidad de mezcla transportada por los sinfines se reduce hasta ser mínima. Este proceso reduce la cabeza de material delante de la regla pavimentadora, provocando la caída del ángulo de la regla. A continuación, el espesor de la capa disminuye gradualmente a medida

que se aproxima al lugar de la junta. De este modo, la junta transversal se construye en un punto bajo de la superficie del nuevo pavimento, dando lugar a un desnivel que será percibido por el tráfico.

Es mucho mejor situar la junta transversal en un punto en el que la cabeza de material delante de la regla sea normal. Sin embargo, este tipo de operación requiere más trabajo por parte del equipo de extendido. Si la junta se realiza donde el espesor del pavimento (cabeza de material) es constante, la regla pavimentadora simplemente se levanta en el punto donde se va a construir la junta. Al hacerlo, se deja una gran cantidad de mezcla en la calzada - la cantidad de mezcla que estaba delante de la regla. Excepto la cantidad de mezcla necesaria para construir un cono, esta mezcla tendrá que retirarse y desperdiciarse o devolverse a la planta de asfalto para ser utilizada como RAP. Además, será necesario eliminar la cantidad de mezcla que quede en la tolva de la pavimentadora. La ventaja de esta práctica, sin embargo, es una transición suave a través de la junta en lugar de una inmersión.

Juntas a tope

Para una junta a tope (Figura 17-1), se construye a mano un frente vertical a lo largo de la anchura que se está pavimentando. Esta operación consiste en rastrillar, palear y, a continuación, retirar el aglomerado que se encuentra aguas abajo de la ubicación de la junta seleccionada. El aglomerado así retirado se desecha o se devuelve a la planta para ser reciclado. La mezcla que se encuentra aguas arriba de la junta no se toca en modo alguno.

La compactación de la mezcla en la parte superior de la junta se realiza de forma normal. Sin embargo, es necesario que los rodillos compacten la mezcla inmediatamente adyacente a la junta. Para que esto se haga correctamente, deben colocarse tablas de escurrimiento junto a la junta. El grosor de las tablas debe ser aproximadamente igual al grosor compactado de la capa que se está colocando. Además, las tablas deben ser lo suficientemente anchas y largas como para soportar el tamaño completo de un rodillo. El equipo de compactación pasa por encima de la mezcla en la junta y sobre las tablas antes de invertir la dirección del rodillo. Esta práctica garantiza que la junta transversal reciba el mismo grado de compactación que el resto de la mezcla de la capa de firme.

Si no se utilizan tablas de escorrentía, la rueda delantera del equipo de compactación se desplaza normalmente hasta la junta transversal, deteniéndose justo antes de la junta. A continuación, se invierte la dirección del rodillo y se compacta el resto de la capa. Ocasionalmente, una de las ruedas del rodillo pasará por el extremo de la hilera, sobre la cara vertical de la junta.

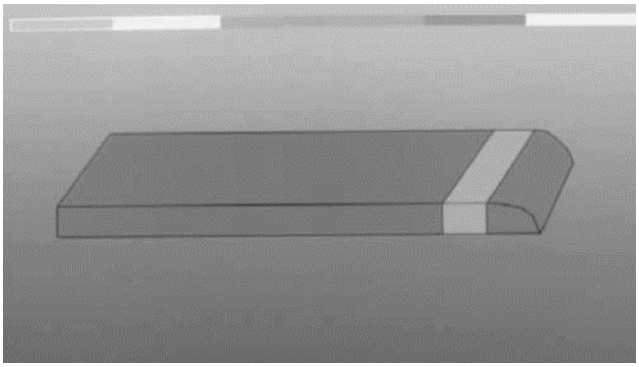


FIGURA 17-1 Construcción de una junta a tope transversal.

Si un rodillo pasa por encima del borde de la junta transversal sin que haya ninguna tabla colocada más allá del borde para soportar el peso de los rodillos, se producirá el redondeo del borde de la junta. El grado de redondeo dependerá del número de veces que el rodillo pase por el borde de la junta y del grosor de la capa que se esté construyendo. En estos casos surgen dos problemas. En primer lugar, el redondeo del borde de la junta a tope impide la construcción de una cara de junta vertical adecuada cuando se reinicia el extendido.

En segundo lugar, el esfuerzo de compactación aplicado a la mezcla asfáltica adyacente (aguas arriba) a la junta suele ser inadecuado. La falta de compactación adecuada provoca a su vez un alto contenido en huecos de aire en la mezcla aguas arriba de la junta y un punto débil y un hundimiento en la superficie del pavimento.

Por lo tanto, deben utilizarse tablas de escurrimiento en la construcción de juntas transversales a tope. Sin embargo, si no se utilizan tablas de escurrimiento, una forma de superar el problema de los bordes es recortar la mezcla hasta un lugar en el que el espesor de la capa sea constante y la densidad cumpla las especificaciones. Esta práctica se ilustra en las figuras 17-2 y 17-3. El extremo redondeado de la junta a tope se recorta y el material sobrante se retira y se desecha. Por lo tanto, la mejor práctica es construir la junta transversal apropiadamente desde el principio.

Después de retirar y desechar los materiales, la zona adyacente a la junta debe limpiarse de polvo y otras partículas sueltas. El borde expuesto debe fijarse ligeramente con una capa de adherencia aceptable.

FIGURA 17-2 Eliminación de material en la junta a tope.

Juntas cónicas

Si el tráfico va a pasar por encima de la junta transversal, deberá construirse una junta cónica o una rampa. Para este tipo de junta, al igual que para la junta a tope, es importante que el operario de la pavimentadora mantenga la cabeza de material delante de la regla de la pavimentadora lo más consistente posible hasta el punto en el que se va a construir la junta para garantizar que el espesor de la mezcla que se está colocando será uniforme hasta la junta. Esto se puede conseguir más fácilmente con una junta cónica que con una junta a tope, porque una parte de la mezcla que queda en la tolva de la pavimentadora y delante de la regla se puede utilizar para construir la junta cónica.

En el lugar de la junta transversal, el aglomerado asfáltico situado aguas abajo de la junta se aleja temporalmente de la junta en sentido longitudinal. Se forma un borde vertical en la cara aguas arriba de la mezcla. Si se va a eliminar la conicidad antes de continuar con la construcción, se colocará papel antiadherente tratado o algún material similar al que no se adhiera el aglomerado asfáltico aguas abajo de la junta, directamente sobre la superficie del firme.

La longitud del papel depende del espesor de la capa que se acaba de colocar, pero normalmente es de 1 a 1,5 m es igual al ancho del carril que se está pavimentando. Si el papel es demasiado corto, el rodillo puede tender a empujar la mezcla, provocando el redondeo de la junta en el lado aguas arriba del papel. Una vez colocado el papel, el aglomerado asfáltico se retira con una pala y se forma un cono en esta mezcla con un laúd o rastrillo. La mezcla que no se utilice para construir el cono se desecha. Si la junta se va a dejar en su lugar de forma permanente, el cono se construye de la misma manera, excepto que no se utiliza el papel tratado.

FIGURA 17-3 Aplicación de la tachuela en la junta a tope.

A veces se utiliza arena o tierra del borde de la calzada como sustituto del papel tratado. Esto no es una buena práctica. Aunque la arena o la suciedad impiden que el material asfáltico del ahusamiento se adhiera a la superficie del pavimento no revestido, es muy difícil eliminar completamente la arena o la suciedad de la superficie una vez que se ha retirado la mezcla del ahusamiento.

Normalmente, parte del material que rompe la adherencia permanece en la superficie existente incluso después de barrerla con una escoba de mano. Esta superficie sucia proporciona un plano de deslizamiento para la nueva mezcla asfáltica, y puede producirse un fallo por empuje en ese punto cuando el nuevo pavimento se somete al tráfico. Esto es cierto incluso si se aplica una capa de adherencia sobre la superficie sucia para mejorar la adherencia de la nueva mezcla al pavimento existente. De hecho, en muchos casos se aplica una cantidad extra de capa de adherencia cerca de la junta para compensar la suciedad en ese lugar. El material extra, sobre todo si no se rompe antes de colocar la nueva mezcla sobre él, puede aumentar las posibilidades de deslizamiento en ese punto. Construir una junta transversal cónica temporal utilizando arena o suciedad como medio para romper la adherencia no es, por tanto, una práctica de pavimentación aceptable.

Otro tipo de junta cónica es la junta aserrada no formada. Para este tipo de junta, el operador de la pavimentadora mantiene la pavimentadora en funcionamiento normal hasta que no hay más mezcla en la tolva o en la cámara del sinfín. En el punto en el que la mezcla deja de ser uniforme en toda la anchura del carril que se está pavimentando, se construye un estrechamiento con la mezcla sobrante. No se forma una cara vertical, y la mezcla simplemente se estrecha desde el espesor de capa adecuado hasta el nivel del pavimento existente adyacente. Todo el aglomerado que no se necesite para realizar la transición se retira y se desperdicia. Cuando llega el momento de continuar con la construcción, se realiza un corte de sierra en el punto en el que comienza la transición Todo el material de la Inclinación inicial se retira y se desperdicia, aunque es difícil retirar este material porque normalmente está adherido a la capa subyacente (véase la sección "Retirada de la transición"). Como se explica más adelante, la cara vertical donde se realizó el corte de sierra debe tratarse con una capa de adherencia antes de continuar con la construcción.

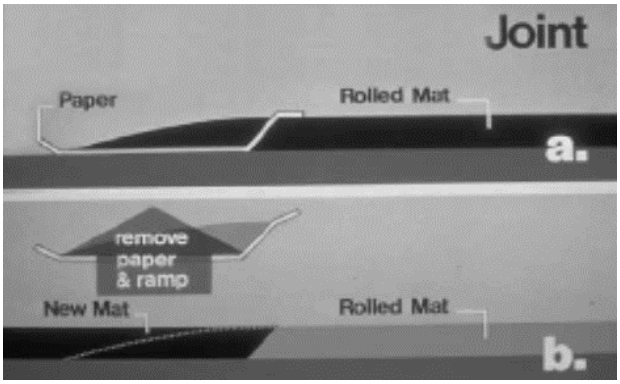


FIGURA 17-4 Utilización de papel tratado en la construcción de juntas de inclinación inicial transversales.

Una ventaja de la junta en bisel es que el equipo de compactación puede pasar sobre el borde de la junta y descender por el bisel sin redondear la junta. Debido a que los rodillos pueden pasar fácilmente por el extremo de la capa, la compactación de la mezcla antes de la junta suele ser superior a la de la mezcla adyacente a una junta de tope. Una segunda ventaja es que, por lo general, hay menos mezcla que palear desde la junta, ya que parte de la mezcla adicional se utiliza para formar el bisel. La desventaja de este tipo de junta es que la mezcla eventualmente debe ser retirada antes de reiniciar la pavimentación después de la junta transversal.

La longitud de una junta en bisel está relacionada con el grosor de la capa de pavimento compactado: cuanto más gruesa sea la capa de MAC, más larga será la conicidad. Muchos organismos utilizan una relación mínima de 12h1 para la longitud del ahusamiento y el espesor de la capa. Por lo tanto, para una mezcla de 25 mm (1 pulg.) de espesor, la longitud del ahusamiento debe ser de al menos 300 mm (1 pie). Para una capa que tenga un espesor compactado de 50 mm (2 pulg.), el bisel debe ser de al menos 600 mm (2 pies) de longitud. Esta relación permite que el tráfico pase con seguridad de un nivel de pavimento al nivel adyacente superior o inferior.

Juntas hechas a mano

En las zonas donde la nueva capa de MAC linda con una estructura existente, como el tablero de un puente, a menudo es necesario colocar la mezcla adyacente a la junta a mano. La mezcla necesaria para completar la junta se deposita en la zona que se va a pavimentar, ya sea por la pavimentadora o por un camión de transporte. Para evitar el exceso de trabajo de la mezcla y la posible segregación, la mezcla debe colocarse lo más cerca posible de su ubicación final. A continuación, la mezcla se esparce a mano, utilizando palas, rastrillos o laúdes.

Para este tipo de trabajo manual, la mezcla debe dejarse alta para permitir la compactación del material por el equipo de rodadura. Dado que la mezcla se coloca a mano, no estará tan compactada como si la hubiera colocado una pavimentadora. La mayoría de las mezclas densas de MAC colocadas con pavimentadora se compactarán aproximadamente 6 mm (1⁄4 pulg.) por cada 25 mm (1 pulg.) de espesor de la capa compactada. La mezcla colocada a mano, sin embargo, será más esponjosa y no tan densa como el material colocado a

máquina. Para permitir la compactación adecuada de la mezcla y asegurar que estará a la elevación correcta para que coincida con la estructura adyacente, el nivel de la mezcla debe ser aproximadamente 9 mm (3⁄8 pulg.) más alto que el pavimento circundante por cada 25 mm (1 pulg.) de espesor de capa compactada.

La zona de trabajo manual debe ser rodada por el equipo de compactación tan pronto como sea posible después de que la mezcla esté en el lugar adecuado. Debido al tiempo necesario para colocar la mezcla, normalmente se retrasará el laminado y la mezcla se enfriará durante el proceso de colocación. Por lo tanto, para alcanzar la densidad requerida, puede ser necesario rodar más.

Reinicio de la pavimentación

Retirada de la inclinación de la junta

Si se ha construido una junta transversal cónica, el aglomerado del cono debe retirarse antes de reanudar el extendido. En el caso de una junta transversal cónica construida con papel tratado, existe poca adherencia entre la mezcla de la inclinación de la junta y el pavimento subyacente. El papel y la mezcla se retiran fácilmente y se devuelven para su reciclaje. Queda una cara vertical en el borde superior de la junta.

Como se ha indicado anteriormente, si se construye una junta inclinada no cónica, primero se debe realizar un corte con sierra transversal en la capa asfáltica donde comienza la inclinación de la junta. Una ventaja de este tipo de junta es que el corte con sierra puede realizarse en cualquier punto longitudinal de la capa de asfalto para garantizar que el grosor de la capa sea constante. Una vez que la junta ha sido cortada completamente a través de la capa de asfalto, se utiliza una cargadora frontal para levantar la mezcla que está aguas abajo del corte con sierra. Como se mencionó anteriormente, una desventaja de este tipo de junta es que a menudo es muy difícil retirar la mezcla de la carretera existente aguas abajo del corte con sierra. Como alternativa, antes de que se reanude la construcción, se puede utilizar una fresadora en frío tanto para formar el borde vertical de la junta transversa como para retirar la mezcla en la inclinación de la junta.

Debe utilizarse una regla recta para determinar el estado de la junta transversal antes de iniciar la pavimentación. Si la mezcla antes de la junta está nivelada, la ubicación de la junta transversal es correcta. Si la regla indica que la mezcla previamente colocada no está nivelada, la ubicación de la junta transversal debe moverse en sentido ascendente hasta un punto en el que la capa de pavimento tenga el espesor y la suavidad adecuados. El aglomerado o mezcla después de la nueva ubicación de la junta deberá ser retirada y desecharse o reciclarse.

Aplicación de la capa de adhesión

La superficie del pavimento existente después de la junta transversa debe ser limpiada y despojada de todos los materiales sueltos y polvo tanto como sea posible. Como se mencionó anteriormente, se debe aplicar una capa de adhesión en la cara vertical de la junta transversa antes de que comience el pavimentado (ver Figura 17-3); la tasa de aplicación de la capa de adhesión debe ajustarse a la cantidad de polvo que quede en la superficie del pavimento. La capa de adhesión debe permitirse que se rompa, pero no necesariamente que se endurezca, antes de que comience el pavimentado.

Uso de bloques iniciales

Como regla general, se espera que el MAC se densifique aproximadamente un 20% bajo la acción del equipo de compactación. Esto significa que la mezcla debe colocarse con un espesor de unos 30 mm (1 $^1/_4$ pulg.), para producir una mezcla compactada de 25 mm (1 pulg.) de espesor. Esta regla debe aplicarse cuando se utilice la pavimentadora para colocar mezcla en una junta transversal.

Si la capa que se va a colocar tiene un espesor de 50 mm (2 pulg.), la mezcla que sale por debajo de la regla debe tener un espesor aproximado de 65 mm (2 $^1/_2$ pulg.,) para permitir la compactación. Por lo tanto, es una práctica incorrecta colocar la regla del pavimentador directamente sobre la capa vieja antes de la junta transversa y comenzar a colocar la nueva mezcla arrastrando la regla sobre el material previamente colocado. Si se hace esto, se colocará una cantidad insuficiente de mezcla en el lado de la junta más cercano a la entrada, y se generará una depresión en la superficie del pavimento compactado. En cambio, la práctica correcta de pavimentado requiere que la regla del pavimentador se coloque sobre un conjunto de bloques de inicio, o tiras de madera, en el lado de la junta más cercano a la salida. Estos bloques deben tener un espesor aproximado de 6 mm (1⁄4 pulg.) por cada 25 mm (1 pulg.) de espesor de capa compactada, como se ha indicado anteriormente.

Los bloques de iniciales deben colocarse completamente bajo la longitud de la regla, de delante hacia atrás, como se ilustra en la Figura 17-5. Deben utilizarse al menos cuatro listones de madera para una regla estándar de hasta 3,65 m (12 pies) de ancho equipada con extensiones rígidas. Si el ancho de la regla con extensiones rígidas es superior a 3,65 m (12 pies), deben utilizarse al menos cinco o seis bloques, en función de la anchura de la regla. Si la pavimentadora está equipada con reglas extensibles hidráulicamente, montadas delante o detrás, deben colocarse al menos cuatro bloques debajo de la regla principal y dos bloques adicionales debajo de cada extensión.

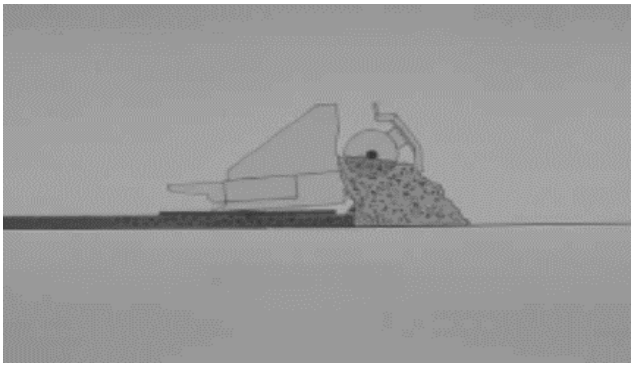


FIGURA 17-5 Utilización de bloques iniciales arranque para pavimentar en una junta transversal.

Si la pavimentadora comienza en una nueva ubicación en la que no hay una capa antigua sobre la que colocar los bloques de inicio y la regla, el grosor de los bloques de inicio debe aumentarse para compensar la falta de mezcla en el lado de la junta que se encuentra aguas arriba. En este caso, si se está construyendo una capa compactada de mezcla de 50 mm (2 pulg.) de espesor, los bloques deben tener unos 65 mm (2 $^1/_2$ pulg.) de espesor para permitir la compactación de la mezcla por los rodillos. Para una capa compactada de 75 mm (3 pulgadas) de grosor, los bloques iniciales deben tener un grosor aproximado de 95 mm (3¾ pulgadas). Por lo tanto, el espesor de los bloques iniciales debe ser aproximadamente el 125% del de la capa de HMA compactada.

Anulación de la regla y ajuste del ángulo de ataque

Después de haber sido colocada sobre los bloques de inicio con el grosor adecuado, la regla debe ser anulada. Esto significa que el ángulo de ataque de la regla debe ajustarse a la posición neutral o plana. Debe ser posible girar ligeramente las manivelas de control del grosor en ambas direcciones cuando la regla esté en la posición anulada, sin aplicar presión sobre la regla y sin ajustar su ángulo de ataque.

Una vez que la regla ha sido anulada, se debe ajustar el ángulo de ataque. Esto se hace girando las manivelas de control del grosor aproximadamente una vuelta completa (dependiendo de la marca y el modelo del pavimentador) e introduciendo un ángulo ascendente en la parte delantera de la regla. Ambas manivelas de control del grosor o manijas (una en cada lado de la máquina) deben ajustarse para que la regla quede correctamente ajustada.

Antes de que la pavimentadora abandone los bloques de salida, debe activarse el sistema de alimentación de material y depositarse mezcla en la cámara del sinfín delante de la regla. Para proporcionar la cantidad adecuada de material delante de la regla, se debe depositar suficiente mezcla para cubrir los sinfines hasta el centro del eje del sinfín.

Una vez que la cámara del sinfín se ha llenado correctamente, se pone en marcha la pavimentadora, se retira la regla de los bloques de arranque y se lleva la pavimentadora a la velocidad de extendido deseada tan rápido como sea posible. A medida que la pavimentadora se desplaza por la calzada, el ángulo de ataque de la regla se ajusta, según sea necesario, para proporcionar el espesor suelto adecuado de la capa de asfalto. Si la regla de la pavimentadora se anula y el ángulo de ataque se ajusta correctamente mientras la regla está en los bloques de arranque, cualquier ajuste necesario de la regla debería ser mínimo.

Rastrillado de la junta

Si la junta transversa se ha construido correctamente hasta este punto, la cantidad de rastrillado requerida será mínima, como se muestra en la Figura 17-6. Si la regla del pavimentador comienza sobre los bloques y si la cabeza de material contra la regla es constante, el grosor de la capa después de la junta será correcto. Muy poca mezcla, si es que alguna, necesitará ser rastrillada de vuelta desde la junta. Nunca hay motivo para rastrillar excesivamente una junta transversa (Figura 17-7).

Cuando se rastrilla una junta, existe la tendencia de que el rastrillo reduzca el grosor de la nueva capa no compactada para igualarla con la elevación del pavimento compactado en el lado anterior de la junta transversa, empujando la mezcla en la junta hacia abajo sobre la nueva capa. Sin embargo, cuando el nivel de la nueva capa no compactada es el mismo que el de la capa vieja compactada, la elevación final del material recién colocado, después de la compactación por los rodillos, estará por debajo de la mezcla en el lado anterior de la junta. El resultado será una depresión en la superficie del pavimento en la junta transversa. Por lo tanto, solo se debe realizar un rastrillado mínimo. El resultado será un hundimiento de la superficie del pavimento en la junta transversal. La regla debe apoyarse sobre la capa no compactada y extenderse sobre la mezcla ya compactada.

Antes de compactar el material del lado de aguas abajo de la junta, se debe utilizar una cuña recta para determinar si la junta es lisa, tal como se muestra en la Figura 17-8.

FIGURA 17-6 Rastrillado de la unión transversal.

FIGURA 17-7 Rastrillado excesivo de la articulación transversal.

La regla debe descansar sobre la capa no compactada y extenderse sobre la mezcla ya compactada. La distancia entre la parte inferior de la regla y la parte superior de la capa compactada debe ser igual a la cantidad de rodado que ocurrirá durante el proceso de compactación, aproximadamente 6 mm por cada 25 mm6 mm por cada 25 mm (1⁄4 pulg. por cada 1 pulg.) de espesor de la capa o estera compactada. La regla debe utilizarse de nuevo para comprobar el nivel de la junta una vez finalizado el proceso de compactación. Obviamente, la mezcla compactada debe estar nivelada a ambos lados de la junta transversal terminada.

Compactación de la junta

Idealmente, una junta transversa debe ser compactada transversalmente (ver Figura 17-9). Esto significa que el equipo utilizado para compactar la junta debe operar a lo largo del ancho del carril en lugar de longitudinalmente sobre la capa.

Sin embargo, si la rodadura se realiza transversalmente, deben utilizarse tableros de desagüe para apoyar el rodillo a medida que se desplaza más allá del borde longitudinal del pavimento. El rodillo debe accionarse de forma que todo lo ancho de la junta reciba la misma fuerza de compactación. Esto es difícil de lograr a menos que las tablas de madera colocadas a cada lado del carril sean lo suficientemente largas como para permitir que el rodillo se mueva completamente sobre la mezcla a ambos lados del pavimento. Además, las restricciones de la obra, como una barandilla adyacente o una pendiente lateral pronunciada, pueden impedir que el rodillo funcione en sentido transversal, y a menudo se crea un problema de seguridad al hacer funcionar el rodillo en sentido transversal si se mantiene el tráfico en el carril adyacente.

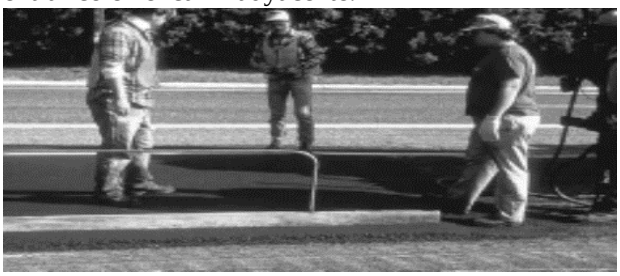


FIGURA 17-8 Comprobación de la suavidad en la junta transversal.

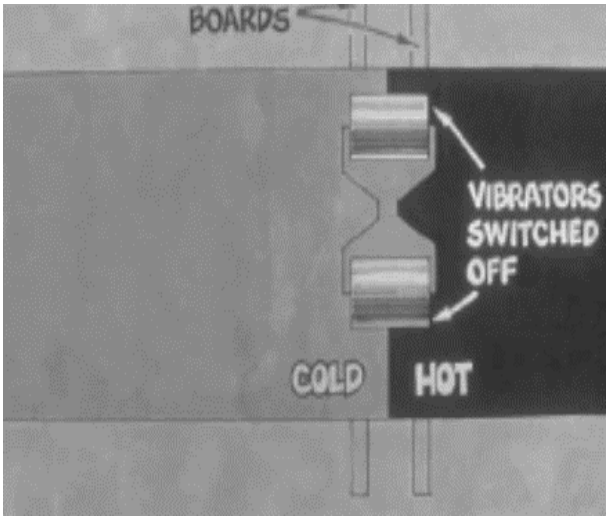


FIGURA 17-9 Laminación horizontal de la junta transversal.

Por estas razones, la junta transversal se suele rodar en dirección longitudinal (Figura 17-10). Sin embargo, la rodadura inicial (de desprendimiento) debe realizarse lo más rápido posible después de que la pavimentadora se haya desplazado fuera de la junta. El rodillo debe pasar lenta y completamente sobre la junta antes de que la máquina retroceda. Si la junta se ha construido correctamente, el proceso de compactación de la junta transversal no difiere del de cualquier otra parte de la mezcla asfáltica.

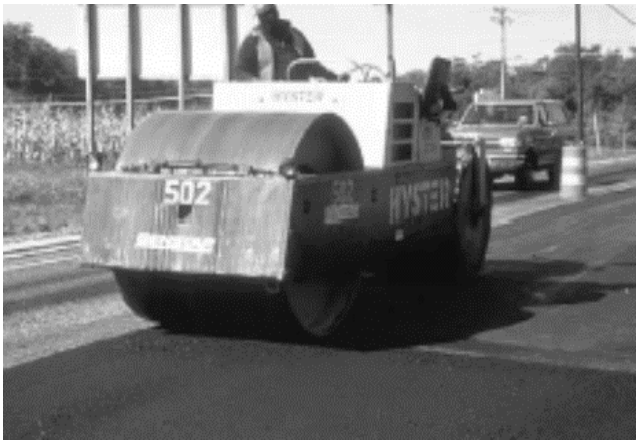


FIGURA 17-10 Laminación longitudinal de la junta transversal.

JUNTAS LONGITUDINALES

Construcción del primer carril

Dos factores clave que afectan la durabilidad a largo plazo de una junta longitudinal están incorporados al pavimento durante la construcción del primer carril. Uno es la importancia de que el pavimentador se

desplace en línea recta para que la junta pueda coincidir en el siguiente paso del pavimentador. El otro es la necesidad de compactar adecuadamente el borde no confinado del primer carril (ver también la discusión detallada sobre compactación en la Sección 18).

Si el operador de la pavimentadora no proporciona una línea recta de mezcla que pueda igualarse en la pasada adyacente del equipo de extendido, será extremadamente difícil construir una junta longitudinal duradera. Se sugiere que el operador de la pavimentadora utilice un alambre conductor para guiar a la pavimentadora mientras se coloca el primer carril. Además, si se utiliza una regla extensible, su anchura debe mantenerse constante; si la regla extensible se mueve hacia dentro y hacia fuera, creará un borde irregular que será muy difícil de igualar.

La compactación del borde no confinado del primer carril también es extremadamente importante. Si no se obtiene el grado de densidad adecuado en el primer carril, la junta se deteriorará con el tráfico. Es fundamental que el rodillo realice el mismo número de pasadas sobre el borde del primer carril que sobre el resto de la anchura del carril. El borde de los tambores del rodillo vibratorio o estático de ruedas de acero debe sobresalir del borde libre del carril al menos 150 mm (6 pulg.). Esta práctica garantizará que el esfuerzo de compactación del rodillo se aplique en dirección vertical sobre el borde no confinado y reducirá en gran medida cualquier tendencia de la mezcla de MAC a desplazarse lateralmente durante la operación de compactación.

En ningún momento el borde de los tambores de un rodillo vibratorio o estático de rueda de acero debe ubicarse justo sobre o justo dentro del borde no confinado del carril. En cualquiera de estas dos posiciones, la mezcla puede desplazarse lateralmente bajo el movimiento hacia adelante del rodillo, particularmente si la mezcla es tierna. Si la mezcla se desplaza, no solo la compactación de la mezcla adyacente al borde no confinado será significativamente menor que la requerida, sino que también se formará una depresión a lo largo de la junta.

Si se utiliza un compactador de neumáticos en la posición de desglose, el borde del neumático exterior no debe colocarse ni encima ni sobre el borde de la mezcla. Más bien, el borde exterior del neumático debe estar a unos 150 mm (6 pulg.) dentro del borde no confinado de la estera. Esto evitará que se redondee el borde de la capa, que la mezcla se desplace lateralmente como resultado de la alta presión de los neumáticos y que se produzca una recogida excesiva cuando los neumáticos pasen por encima del borde. A continuación, la compactación de la mezcla en el borde no confinado debe realizarse con un rodillo de ruedas de acero, ya sea en modo vibratorio o estático.

Es importante tener en cuenta que la mayor parte de la masa de un núcleo cortado de una junta longitudinal para medir la densidad de la junta se extrae realmente del primer carril del pavimento, no del segundo. El borde no confinado de la mezcla que sale de la compuerta final de la pavimentadora suele tener una inclinación de unos 60 grados. La mezcla colocada en el carril adyacente se coloca contra esta pendiente. Sin embargo, cuando se toma un testigo para determinar la densidad, normalmente se taladra desde la parte superior de la junta que es visible en la superficie del pavimento, la mitad a cada lado de la línea de la junta.

Recorte de la junta

En algunos casos, antes de construir la junta longitudinal entre dos carriles adyacentes de pavimento, el borde longitudinal de la mezcla previamente colocada se recorta una distancia de 50 a 150 mm (2 a 6 pulg.). Para ello se utiliza una rueda de corte que suele estar acoplada a un rodillo (Figura 17-11), pero que también puede estar acoplada a una motoniveladora o a un cargador frontal. El propósito de esta operación es volver a mover la parte de la mezcla en la junta longitudinal que puede tener una densidad más baja que la parte principal de la estera debido a la falta de confinamiento de la mezcla durante el proceso de compactación. Esta falta de densidad se debe normalmente a un saliente inadecuado del borde del rodillo sobre el borde no confinado del primer carril durante la construcción.

Si se recorta el primer carril, se debe aplicar una capa de adherencia en la cara recién expuesta de la junta longitudinal justo antes de colocar el carril adyacente.

Durante este proceso, se forma una cara vertical, en lugar de la cara inclinada normal de 60 grados, en la junta longitudinal. Esta práctica permite generalmente obtener un aumento de densidad en la estera recién colocada adyacente a la junta cortada. Sin embargo, se puede obtener una densidad de junta adecuada sin cortar la junta longitudinal - compactando adecuadamente la primera vía, como se ha comentado anteriormente, y solapando y compactando adecuadamente la mezcla en la segunda vía, como se comenta a continuación.

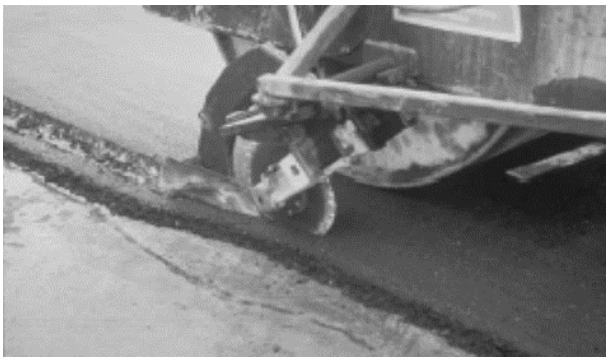


FIGURA 17-11 Disco de corte utilizado para construir la junta longitudinal

Aplicación de la capa de adherencia

Si el borde libre del primer carril no está recortado y la mezcla a lo largo de la junta está limpia, normalmente no es necesario aplicar una capa de adherencia. Aunque algunos organismos exigen que se aplique una capa de adherencia en el borde de una junta longitudinal antes de construir el carril siguiente, muchos otros no lo hacen. Una capa de adherencia a lo largo de la junta, si no se aplica demasiado, debería ayudar a crear una unión entre las dos capas adyacentes. Por otro lado, no hay pruebas de que el uso de una capa de adherencia aumente significativamente la durabilidad de la junta bajo el tráfico. Otras técnicas operativas suelen afectar a la longevidad de la junta más que la presencia o ausencia de una capa de adherencia.

Solapamiento de la junta

Una clave para la construcción de una buena junta longitudinal entre carriles de MAC es la cantidad de traslape entre las esteras nuevas y las previamente colocadas. El traslape típico en juntas longitudinales no es mayor de 25 a 38 mm (1 a $1^1/_2$ pulg.), como se muestra en la Figura 17-12. Esta cantidad de solapamiento proporciona suficiente material en la parte superior de la junta para permitir una compactación adecuada sin tener mezcla extra que deba ser empujada hacia atrás de la junta por un rastrillo.

Sin embargo, si se realiza correctamente (véase la Figura 17-13), el rastrillado normalmente permite aumentar la compactación en la junta. La altura de la nueva mezcla sobre la mezcla compactada debe ser de 6 mm por cada 25 mm (1⁄4 pulg. por cada 1 pulg.) de mezcla compactada.

A medida que los sinfines transportan la mezcla hacia los lados de la pavimentadora, éste es empujado hacia la compuerta final de la regla del pavimentador. Sin embargo, dado que los sinfines no se extienden por toda lo ancho de la regla, la mezcla inmediatamente

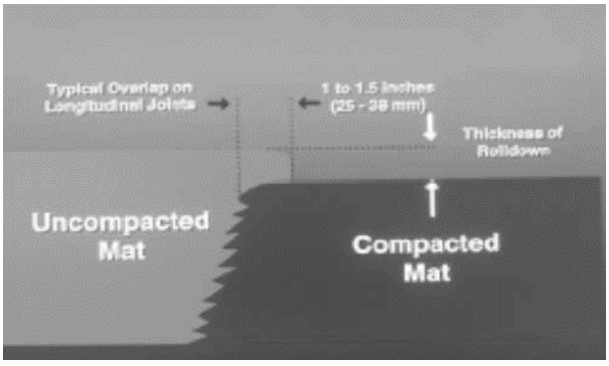


FIGURA 17-12 Aumento de espesor de la mezcla no compactada en la junta longitudinal.

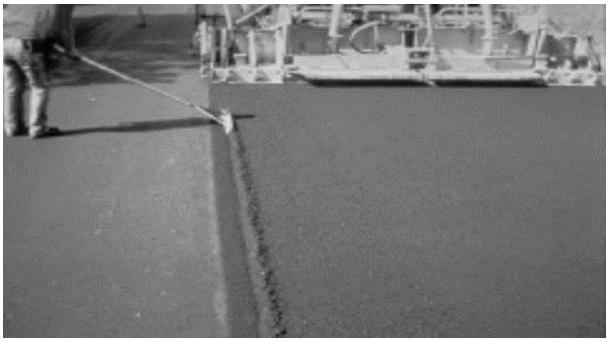


FIGURA 17-13 Rastrillado de la junta longitudinal.

adyacente a la compuerta final a lo largo de la junta longitudinal es mucho menos densa que la mezcla que pasa por debajo de la regla principal o la parte central de una regla extensible. Además, dado que la mezcla de la compuerta final no está confinada durante un periodo de tiempo tan largo como la mezcla que se encuentra a lo largo de la parte interior de la regla, la mezcla de la primera ubicación suele ser menos densa. Y debido a la naturaleza más esponjosa de la mezcla en la compuerta final, se coloca menos mezcla en ese lugar. En consecuencia, muchos fabricantes de pavimentadoras han modificado recientemente el diseño de la compuerta final para proporcionar un mayor confinamiento de la mezcla.

Un problema que puede ocurrir con la construcción de la junta longitudinal es un exceso de superposición de la regla del pavimentador sobre la capa ya colocada. Este problema puede surgir porque el operador de la regla tiene la puerta trasera de la regla colgando demasiado sobre el primer carril. También puede ser causado, en parte, por un borde longitudinal irregular o ondulado en el primer pase del pavimentador. Dado que el HMA adicional no puede ser empujado hacia la capa ya compactada del primer carril, normalmente se raspa o nivela sobre la nueva capa. Si el borde longitudinal del primer carril es recto y se utiliza la cantidad correcta de superposición, la cantidad de raspado requerida será mínima.

Si la cantidad de solapamiento del primer carril es correcta [no más de 40 mm (1 1⁄2 pulg., uno y un medio) en la parte superior de la junta] y si la altura de la mezcla es correcta [no más de 6 mm por 25 mm (1⁄4 pulg. por 1 pulg.) de grosor de la capa compactada], no habrá exceso de mezcla que se desplace de la junta a la nueva capa. La pequeña cantidad de mezcla que se solapa con el primer carril se mezclará fácilmente con la junta durante el extendido.

Rastrillado de la junta

Hay quienes creen que siempre es necesario rastrillar una junta longitudinal. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, si se coloca la cantidad correcta de mezcla en el lugar adecuado, el rastrillado

debería ser mínimo o nulo. El rastrillado puede, por supuesto, ser necesario cuando se pavimentan desvíos de calzadas o buzones, cuando se construye una intersección, o cuando es necesario igualar el grado de las entradas o arquetas de drenaje existentes. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, el rastrillado nunca debe ser excesivo y la cantidad de mezcla desplazada debe ser constante, especialmente a lo largo de la junta longitudinal.

Algunos creen que el rastrillo debe "golpear" la junta, desplazando la mezcla desde la parte superior del primer carril hasta la nueva capa directamente sobre la junta, dejando un pequeño montículo de mezcla para que los rodillos la compacten. Si se deja demasiado material sobre la junta, el rodillo tenderá a pasar por encima de la joroba y no entrará en contacto con la mezcla adyacente, que también debe compactarse. Además, como no hay sitio para esta mezcla extra, suele quedar una pequeña protuberancia a lo largo de la junta una vez finalizado el proceso de compactación. Además, si la cantidad de mezcla solapada en el primer carril no es consistente, el volumen del bache creado será variable, y esta variabilidad también afectará a la consistencia de la densidad y uniformidad de la junta. Por lo tanto, no se recomienda un exceso de mezcla en la junta.

Por lo general, el rastrillado no se realiza de forma sistemática. El rastrillo o el laúd suelen utilizarse para empujar la mezcla desde el primer carril hasta el nuevo. A veces la mezcla se deposita a poca distancia de la junta, mientras que otras veces se lanza a mitad de la anchura del carril nuevo. Si el carril adyacente se solapa demasiado y se deposita demasiada mezcla en la antigua capa, el material sobrante debe retirarse de la junta en lugar de empujarse sobre la nueva mezcla. La mezcla sobrante no debe esparcirse por el carril nuevo, sino que debe recogerse y desecharse. Mejor aún, no debería haberse colocado inicialmente sobre la parte superior del primer carril.

El rastrillador típicamente coloca el rastrillo o el laúd plano sobre la superficie del pavimento existente, fuera del borde de la nueva mezcla en la parte superior del primer carril. A medida que el rastrillo se mueve transversalmente en la mezcla y a través de la parte superior de la junta, toda la mezcla se limpia de la estera existente y se empuja sobre la nueva capa.

Debido a que el rastrillo no levanta el rastrillo en la junta, sino que lo mueve hacia adelante y hacia atrás en un movimiento continuo de barrido o balanceo, hay una falta de mezcla en la junta. La mezcla que debería haber estado en su lugar y lista para ser compactada a lo largo de la junta se encuentra ahora en parte a lo ancho de la nueva estera. En la mayoría de los casos, el nivel de la mezcla sin compactar adyacente a la junta en la nueva estera está a la misma elevación que la mezcla compactada en el otro lado de la junta. En algunos casos, se rastrilla tanta mezcla de la junta que se produce un hundimiento en la junta longitudinal incluso antes de que comience la compactación de la mezcla. Cuando se produce cualquiera de estos dos problemas, resulta imposible obtener el grado de densidad requerido en la junta porque no hay suficiente mezcla en la junta para la compactación por los rodillos. Además, cuando el aglomerado que se desprende de la junta longitudinal se deposita sobre la nueva capa asfáltica, cambia la textura de la superficie de la capa donde se deposita. Dependiendo de la gradación del aglomerado que se coloque, el resultado puede ser una diferencia significativa en la textura de la capa de un lado a otro del carril.

Un rastrillado excesivo de la junta longitudinal es muy perjudicial para el rendimiento a largo plazo de la junta debido al efecto sobre la densidad a lo largo de la junta. Se pueden construir excelentes juntas longitudinales con un rastrillado mínimo o nulo, si se consigue el solapamiento adecuado de la nueva mezcla sobre la estera previamente colocada. Por lo tanto, se recomienda eliminar el rastrillado de la junta longitudinal si se puede obtener un solapamiento y una compactación adecuado.

Compactación de la junta longitudinal

Si el nivel de la mezcla nueva sin compactar está al mismo nivel o por debajo del nivel de la mezcla compactada en el carril adyacente, el equipo de compactación con ruedas de acero no podrá densificar adecuadamente la mezcla a lo largo de la junta. Tanto si la primera pasada del rodillo se realiza por el lado caliente de la junta como por el lado frío (Figura 17-14), parte del peso de los tambores del rodillo se apoyará sobre la mezcla previamente compactada. Como resultado, el equipo de compactación puenteará la mezcla en la junta, dejándola esencialmente sin compactar o sólo parcialmente compactada. Por lo tanto, el nivel de la mezcla en la junta longitudinal debe estar por encima del de la mezcla compactada en una cantidad igual a aproximadamente 6 mm por cada 25 mm (1⁄4 pulg. por cada 1 pulg.) de pavimento compactado si se desea lograr una compactación adecuada de la mezcla en la junta.

FIGURA 17-14 Comenzar la compactación de la junta longitudinal por el lado frío, ya no es una práctica recomendada

El uso de un rodillo de ruedas de acero, operado en modo vibratorio o estático, para compactar la junta longitudinal generalmente da como resultado la formación de puentes de la mezcla en la junta y, por lo tanto, una falta de densidad debido a la falta de mezcla. La densidad puede obtenerse a lo largo de la junta mediante el uso de un compactador neumático. El neumático exterior de este tipo de equipo de compactación puede colocarse directamente sobre la mezcla en la junta. La fuerza de compactación aplicada por este neumático puede aumentar significativamente la densidad obtenida en ese punto. No obstante, la superficie del pavimento seguirá hundiéndose a lo largo de la junta si falta mezcla en ese punto. Para conseguir una densidad adecuada a lo largo de la junta, debe haber suficiente MAC para compactar, independientemente del tipo de rodillo utilizado.

Rodillo desde el lado caliente

La forma más eficaz de compactar una junta longitudinal es colocar el rodillo sobre la capa caliente (nueva) y la regla la junta una distancia aproximada de 150 mm (6 pulg.) sobre la capa fría. La mayor parte del peso del equipo de compactación está donde más se necesita - sobre la nueva capa. La mezcla en la junta es compactada en el área de la junta por el rodillo siempre y cuando la nueva mezcla en la junta tenga la altura adecuada. La pendiente a lo largo del borde del primer carril y la menor densidad de la mezcla colocada junto a la compuerta del extremo de la pavimentadora proporcionan el volumen necesario para que la mezcla se mezcle a lo largo de la junta sin dejar un montículo en la misma. Para compactar la junta longitudinal se puede utilizar cualquier tipo de rodillo utilizado para la rodadura de desglose de la mezcla: rodillo de ruedas de acero vibratorio o estático o rodillo de neumáticos, siempre y cuando la elevación de la mezcla en la junta esté por encima de la de la capa fría y la mezcla nueva esté todavía caliente. La figura 17-15 muestra una junta longitudinal compactada con un compactador neumático.

A veces, la primera pasada del rodillo se completa con el borde del equipo a unos 150 mm (6 pulg.) de la junta longitudinal (véase la Figura 17-16), en la creencia de que el rodillo empujará la mezcla hacia la junta y, de este modo, se obtendrá una mejor compactación. Sin embargo, si la mezcla que se está colocando es lo suficientemente estable, el rodillo no debería ser capaz de mover el material lateralmente de forma significativa. Por lo tanto, si el diseño de la mezcla es adecuado, este método de compactación de la junta no proporciona ninguna ventaja sobre la realización de la primera pasada del rodillo 150 mm (6 pulg.) fuera de la junta. Incluso si la mezcla es blanda, este método de compactación no presenta ninguna ventaja. Si el rodillo puede mover la mezcla lateralmente, deberá revisarse el diseño de la mezcla para determinar si puede producirse una mezcla más estable.

Si la mezcla se desplaza hacia la junta, se producirá un exceso de mezcla en forma de montículo a lo largo de la junta, lo que a su vez provocará una falta de mezcla justo fuera del borde del tambor del rodillo, entre el rodillo y la junta. Cuando el rodillo se desplace para compactar el aglomerado en la junta, los tambores se desplazarán por encima del exceso de aglomerado, tratando de empujar el aglomerado de vuelta a su lugar de origen. Con este procedimiento, el nivel de densidad obtenido en la junta puede ser muy variable.

En resumen, no parece haber ninguna ventaja en realizar la primera pasada del rodillo dentro de la junta a cierta distancia. El solapamiento del rodillo sobre el pavimento antiguo adyacente suele ser la forma más eficaz de proporcionar cobertura de rodillo para toda la anchura del pavimento. Además, el método de solapamiento proporciona un nivel de densidad más uniforme en la junta longitudinal que la realización de la primera pasada del rodillo dentro de la junta.

FIGURA 17-15 Compactación de junta longitudinal con compactador de neumáticos

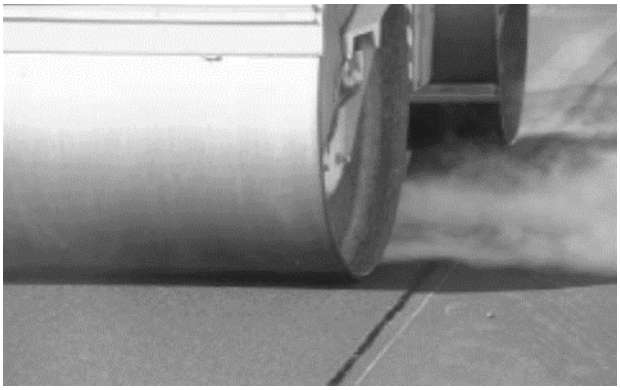


FIGURA 17-16 Compactación con el borde del equipo dentro de la junta longitudinal.

Rodillo desde el lado frío

En el pasado era práctica común hacer el rodado inicial de la junta longitudinal desde el lado frío (estera previamente colocada) de la junta, como se ve en la Figura 17-14. Con este método, la mayor parte del peso del rodillo es soportado por la estera fría y compactada. Con este método, la mayor parte del peso del rodillo es soportado por la estera fría y compactada. Sólo unos 150 mm (6 pulg.) de la anchura del rodillo cuelgan sobre la capa fresca, comprimiendo la mezcla a lo largo de la junta. La mayor parte de la fuerza de compactación se desperdicia porque el rodillo está esencialmente aplicando su fuerza de compactación a un material MAC ya compactado.

Mientras el rodillo trabaja en el lado frío de la junta longitudinal, la mezcla del lado caliente de la junta, así como el resto de la mezcla de la capa que se está colocando, se está enfriando. Dependiendo de las condiciones ambientales y del espesor de la mezcla que se está colocando, la compactación de la junta desde el lado frío a menudo dificulta la capacidad de obtener la densidad deseada en toda la anchura del pavimento. La razón que se aduce a menudo para rodar la junta desde el lado frío es que este método permite a los rodillos "pellizcar" la junta, con lo que se obtiene un mayor grado de densidad. Un borde del tambor del rodillo se desplaza sobre la mezcla nueva, mientras que el otro borde está en contacto con la mezcla vieja a cierta distancia a través del primer carril. De este modo, se aplica más peso del rodillo a la nueva mezcla, lo que supuestamente produce más densidad. Sin embargo, investigaciones recientes han indicado que se puede obtener la misma densidad en la junta longitudinal tanto si la rodadura inicial se realiza desde el lado caliente como desde el lado frío. Dado que es más eficaz compactar toda la estera, así como la junta, desde el lado caliente, no se recomienda la compactación desde el lado frío.

Independientemente del método utilizado para compactar la junta longitudinal, el nivel de densidad obtenido en ese lugar suele ser al menos un 2% inferior a la densidad media que puede producirse en la parte principal de la capa. Esta diferencia se debe principalmente a que el primer carril tiene un borde no confinado que tiende a moverse lateralmente. Incluso si el borde no confinado del primer carril se compacta, permitiendo que el rodillo cuelgue sobre el borde, la densidad en la junta seguirá siendo inferior a la que puede alcanzarse en la parte principal de la capa. Si en las especificaciones se exige un determinado nivel de densidad en la junta, el porcentaje de la densidad máxima teórica de la mezcla en la junta deberá ser inferior al exigido para el resto de la capa.

Juntas en cuña

Si se permite que el tráfico cruce una junta longitudinal antes de construir el segundo carril, algunos organismos limitan la profundidad compactada de MAC que puede colocarse. En tales casos, puede especificarse una junta en cuña.

La cuña suele formarse durante la primera pasada de la pavimentadora fijando un encofrado metálico a la compuerta del extremo de la regla pavimentadora. El grado de inclinación de la cuña varía, normalmente de 6h1 a 12h1 de horizontal a vertical. La parte superior de la cuña debe tener una muesca para poder colocar directamente en la junta suficiente material para la compactación durante la segunda pasada. La formación de la cuña no es especialmente problemática.

La pendiente transversal de la cuña es diferente a la de la alfombra principal. Además, la cuña es bastante estrecha. Por lo tanto, es difícil obtener una densidad adecuada en el HMA de la cuña antes de colocar el carril adyacente. Si los rodillos utilizados para compactar el resto de la anchura de la capa se utilizan para compactar la cuña, puede producirse un redondeo del borde. Esto, a su vez, hará mucho más difícil igualar la parte superior de la junta cuando se construya el carril siguiente.

Se han utilizado diferentes tipos de rodillos pequeños para compactar la mezcla en la cuña. La figura 17-17 ilustra uno de estos intentos. En general, debido a la falta de peso de este tipo de equipo de compactación, no puede utilizarse para alcanzar el nivel deseado de densidad en el material de la cuña. Sin embargo, cuando se coloca el carril adyacente, el calor ablanda la cuña, permitiendo cierta compactación adicional.

Otro problema potencial asociado a las juntas está relacionado con la capacidad de igualar la junta uniformemente cuando se coloca el carril adyacente. Este problema se debe a dos razones. En primer lugar, si el borde se ha redondeado durante la operación de compactación, el borde irregular resultante será difícil de igualar con la segunda pasada. Además, será necesario desmenuzar la mezcla en el nuevo carril e intentar mezclar ese material con la mezcla del primer carril. Dependiendo del tamaño de los áridos incorporados a la mezcla, este proceso de emparejado

puede no tener un éxito uniforme. Cuando se coloca el segundo carril y la mezcla se mezcla en el primer carril, las partículas de árido más grandes de la mezcla quedarán expuestas en el lugar donde la mezcla se ha mezclado. El resultado puede ser una textura de la superficie mucho más rugosa en la zona de la junta y un posible aplastamiento del árido grueso bajo los rodillos. Se producirá entonces un desprendimiento significativo de la mezcla bajo el tráfico. Debido a la penetración de la mezcla nueva en la mezcla vieja en la junta de cuña, el rendimiento de algunas juntas de cuña bajo el tráfico ha sido menos que deseable.

Una forma de mejorar el rendimiento de una junta en cuña es construir una cara vertical corta en el borde del primer carril antes de formar la cuña. En este caso, la profundidad y el tamaño de la cuña se reducen. Normalmente, la mitad del grosor de la capa no compactada se construye verticalmente mediante un encofrado metálico fijado a la compuerta del extremo de la regla pavimentadora; el grosor restante se forma en cuña mediante el mismo encofrado. Este tipo de junta en cuña presenta varias ventajas. En primer lugar, al reducirse la cantidad de mezcla en la cuña, hay menos mezcla en la junta longitudinal con menor densidad que en la junta de cuña completa. En segundo lugar, debido a la cara vertical en la parte superior de la junta, es más fácil atar la mezcla en el segundo carril sin tener que hacer una junta degradada.

De este modo, se reduce considerablemente la posibilidad de que la nueva mezcla se deshilache en la junta. Además, la textura de la superficie de la mezcla en la junta es uniforme ya que la mezcla no tiene que ser emplumada, y el árido grueso de la mezcla no será aplastado por los rodillos.

La junta en cuña construida con una cara vertical corta también funciona bien desde el punto de vista de la seguridad del tráfico durante la construcción. La clave para un buen rendimiento en la junta es garantizar que se obtiene una densidad adecuada. El proceso de construcción de la junta debe garantizar una buena densidad de la misma.

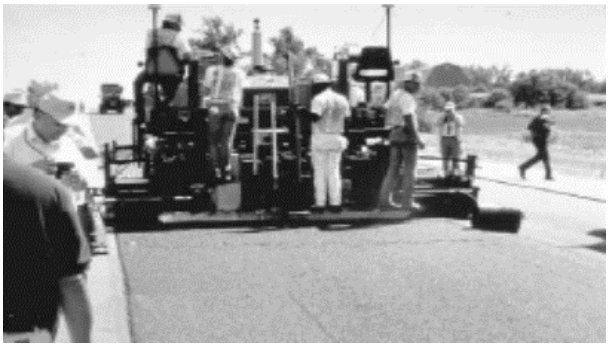


FIGURA 17-17 Compactación de mezcla en junta de cuña.

Pavimentación en escalón

Si se utiliza la pavimentación en escalón (dos pavimentadoras colocadas una al lado de la otra en carriles adyacentes), la construcción de la junta longitudinal se modifica de forma que la compactación del borde no confinado del primer carril se retrasa hasta que se coloca el segundo carril. También se modifica la cantidad de solapamiento entre el primer y el segundo carril. La distancia en la que la compuerta lateral de la regla de la pavimentadora trasera se extiende sobre la capa no compactada detrás de la primera pavimentadora no debe exceder los 25 mm (1 pulg). La compuerta final de la regla de la segunda pavimentadora debe colocarse al mismo nivel que la parte inferior de la placa de la regla de la primera pavimentadora. De este modo se evitará que la compuerta final de la regla de la segunda pavimentadora se arrastre sobre la mezcla colocada por la primera pavimentadora o la pavimentadora principal y cambie la textura de la superficie de la mezcla en la zona del solapamiento.

No es necesario rastrillar la junta. El proceso de compactación se modifica de modo que los rodillos que densifican la mezcla detrás de la pavimentadora principal deben permanecer a unos 150 mm (6 pulg.) del borde libre de la capa en el lado hacia la segunda pavimentadora. Una vez que la mezcla de la segunda pavimentadora o de la pavimentadora de arrastre se ha colocado contra el borde no compactado de la mezcla de la primera pavimentadora, los rodillos que compactan el segundo carril se utilizan para densificar la mezcla a lo largo de la junta. Con un extendido y compactación adecuados, suele ser difícil ver la posición de la junta longitudinal producida por el proceso de extendido en escalón. Además, el uso de esta técnica normalmente da como resultado que la densidad de la junta longitudinal sea igual a la de la capa adyacente.

RESUMEN

Al supervisar las operaciones de construcción de juntas deben tenerse en cuenta los siguientes factores:

- Si se va a construir una junta transversal recta, el operador de la pavimentadora debe mantener un flujo constante de material frente a la regla hasta un punto posterior a la ubicación donde se construirá la junta. Para evitar una disminución en el espesor de la capa antes de la junta transversal, no se debe permitir que el operador deje vacíos la tolva, los transportadores de listones y los sinfines antes de alcanzar la ubicación de la junta.
- Para la construcción de una junta transversal recta, se debe garantizar que la compactación de la mezcla adyacente a la junta sea igual al grado de

compactación de la mezcla previamente colocada, evitando redondear el extremo de la mezcla en la junta.

- Cuando se reinicie la pavimentación, deberá retirarse la mezcla asfáltica del estrechamiento y, a continuación, desecharse o reciclarse. En el lugar elegido para la junta deberá haber una cara vertical, o la mezcla deberá recortarse para crear una cara vertical. Deberá aplicarse una capa de adherencia a la superficie del pavimento existente en el lugar de la junta.
- La regla de la pavimentadora debe colocarse sobre bloques de arranque en el lado frío de la junta transversal. El espesor de los bloques de arranque debe ser de 6 mm (1⁄4 pulg.) por cada 25 mm (1 pulg.) de espesor de capa compactada cuando los bloques y la regla de la pavimentadora se asienten sobre otra capa de pavimento. Si la pavimentadora está comenzando a colocar mezcla en una nueva ubicación, el espesor de los bloques iniciales debe ser el mismo que el de la nueva capa compactada más 6 mm por cada 25 mm (1⁄4 pulg.) de espesor de capa compactada. Es imposible construir una junta transversal adecuada si no se utilizan bloques para llevar la regla a la elevación adecuada en el lado frío de la junta antes de iniciar la pavimentación.
- La mezcla en el lado aguas abajo de la junta transversal debe ser más alta que la del lado previamente compactado de la junta para permitir un adecuado deslizamiento de la mezcla recién colocada.
- Se necesita un rastrillado mínimo en una junta transversal correctamente construida.
- Idealmente, una junta transversal debería compactarse con el rodillo en dirección transversal. Sin embargo, en la práctica y por razones de seguridad, una junta transversal puede compactarse correctamente con el rodillo en dirección longitudinal siempre que la elevación inicial de la mezcla nueva esté por encima de la de la mezcla antigua en el lado frío de la junta.
- Para conseguir una densidad adecuada en la junta longitudinal, es esencial compactar correctamente el borde no confinado del primer carril. El borde del tambor de un rodillo de ruedas de acero vibratorio o estático debe sobresalir del borde de la mezcla un mínimo de 150 mm (6 pulg.) cuando se esté densificando el primer carril.
- Durante la construcción de una junta longitudinal, la compuerta final de la pavimentadora debe solapar el carril previamente colocado en no más de 40 mm ($1\ ^1/_2$ pulg.). Cualquier aumento en el solapamiento más allá de esta distancia resultará en un exceso de material que tendrá que ser rastrillado fuera de lajunta. La nueva mezcla debe ser 6 mm por 25 mm (1⁄4 pulg. por pulg.) más gruesa que la mezcla compactada.
- El rastrillado de la junta longitudinal debe ser mínimo o nulo si el recubrimiento de la solera pavimentadora en el carril adyacente es de 40 mm (1- 1/2 pulg.) o inferior. La mezcla no debe golpearse contra la junta, ya que entonces será imposible mezclar la mezcla sobrante con la nueva mezcla durante el proceso de compactación. En ningún caso el rastrillo debe esparcir la mezcla a lo ancho del nuevo carril.
- La compactación de la junta longitudinal debe ser hecho rodando desde el lado caliente de la capa, con las ruedas del rodillo superponiéndose aproximadamente 150 mm (6 pulgadas) sobre la mezcla fría. No se recomienda que el primer pase del rodillo en el lado caliente de la junta se realice dentro de la junta. Es mucho más eficiente que el primer pase del rodillo se extienda por una corta distancia sobre el lado frío de la junta.
- Si se construye una junta en cuña, se debe formar una cara vertical corta en la parte superior de la junta para minimizar la cantidad de mezcla contenida en la cuña y permitir que la mezcla del segundo carril se coloque y compacte contra el primer carril. Este procedimiento también minimizará la cantidad de raspado que puede producirse en este tipo de junta si el segundo carril se introduce en el primero

18 Compactación

La compactación es el factor más importante en el rendimiento de un pavimento de MAC. La compactación adecuada de la mezcla aumenta la vida a la fatiga, disminuye la deformación permanente (ahuellamiento), reduce la oxidación o el envejecimiento, disminuye el daño por humedad, aumenta la resistencia y la estabilidad, y disminuye el agrietamiento a baja temperatura. Una mezcla de MAC con todas las características deseables de diseño de mezcla tendrá un rendimiento deficiente bajo el tráfico de no haber sido compactada hasta el nivel de densidad adecuado. De hecho, una mezcla correctamente compactada con propiedades marginales a menudo superará a una mezcla con propiedades deseables que haya sido compactada inadecuadamente.

DEFINICIONES

La densidad de un material es simplemente el peso del material que ocupa un determinado volumen de espacio. Por ejemplo, una mezcla de MAC con agregado de piedra caliza puede tener una densidad compactada de 2355 kg (147 lb/ft3). Esta densidad, o peso unitario, es una indicación del grado de compactación de la mezcla. Los materiales de pavimentación fabricados con distintos áridos pueden tener densidades significativamente diferentes. Una mezcla de MAC fabricada con áridos ligeros, por ejemplo, puede tener una densidad compactada de sólo 1362 kg/m3 (85 lb/ft3).

La compactación es el proceso mediante el cual la mezcla asfáltica se comprime y reduce su volumen. La compactación reduce los vacíos de aire y aumenta el peso unitario o la densidad de la mezcla. Como resultado del proceso de compactación, los áridos revestidos de asfalto de la mezcla se acercan entre sí, lo que aumenta el entrelazamiento de los áridos y la fricción entre las partículas y reduce el contenido de aire de la mezcla.

Es posible, en condiciones controladas de laboratorio, determinar la densidad de MAC necesaria para proporcionar cero vacíos de aire. En este punto, denominado densidad máxima teórica, no quedarán huecos de aire en la mezcla. La densidad máxima teórica puede calcularse a partir de los porcentajes y el peso específico de cada componente de la mezcla. También puede determinarse a partir de un ensayo de laboratorio, el método de ensayo ASTM D2041, Densidad y gravedad específica máximas teóricas de mezclas bituminosas de pavimentación, a veces denominado ensayo de Rice. Este último procedimiento es preferible para determinar la densidad máxima teórica en comparación con los cálculos de los componentes de la mezcla.

En la carretera no es posible compactar una mezcla bien diseñada hasta una condición sin vacíos; por lo tanto, todas las mezclas asfálticas contendrán algunos vacíos de aire una vez que el proceso de compactación haya sido completado. El contenido de vacíos de aire en la mezcla es simplemente el volumen de los espacios entre las partículas recubiertas de asfalto. Dado que este volumen no puede medirse directamente, se utiliza una relación entre el peso unitario de la mezcla compactada y la densidad máxima teórica. El contenido de vacíos de aire se determina a partir de la relación entre la gravedad específica aparente de la mezcla y la densidad máxima teórica, según la fórmula siguiente: porcentaje de vacíos de aire = 100[1 - (gravedad específica aparente). Así, si la densidad aparente es del 95% de la densidad máxima teórica, la mezcla tiene un 5% de huecos de aire.

Como ejemplo, supongamos que la densidad compactada de una mezcla de MAC es de 2355 kg. (147,0 libras/pie3) y que la densidad teórica máxima de la misma mezcla es de 2467 kg/m3 (154,0 lb/pie3). El contenido en aire de la mezcla será la diferencia entre los dos valores, 2467 - 2355 = 112 kg/m3. (154.0 − 147.0 = 7.0 lb/pie3), dividido por el valor de la densidad teórica máxima de 2467 kg/m3 (154,0 lb/pie3), es decir, un 4,5%.

FACTORES QUE AFECTAN A LA COMPACTACIÓN

Cuatro factores principales afectan a la capacidad del equipo de compactación para densificar una mezcla asfáltica: las propiedades de los materiales de la mezcla, las variables ambientales, las condiciones del lugar de colocación y el tipo de equipo de compactación utilizado. A continuación, se analiza cada uno de estos factores.

Propiedades de los materiales

Áridos

La compactibilidad o rigidez de una mezcla de MAC está influida por la naturaleza de las partículas de áridos y la gradación de los áridos en la mezcla. Tres

propiedades de las partículas de árido grueso utilizadas en una mezcla asfáltica pueden afectar a la capacidad de obtener el nivel adecuado de densidad: la textura superficial, la forma de las partículas y el número de caras fracturadas (superficies ásperas o angulares de las partículas que afectan tanto la compactación como las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica). Al aumentar la angulosidad del árido, el tamaño máximo nominal del árido y la dureza del árido (granito comparado con piedra caliza, por ejemplo), aumenta el esfuerzo de compactación necesario para obtener un nivel específico de densidad. Las partículas angulares ofrecen más resistencia a la reorientación por los rodillos que las partículas redondeadas; por lo tanto, el aumento de la angularidad incrementa la resistencia a la densificación por el esfuerzo de compactación aplicado.

También es importante la textura de la superficie de los áridos. Los áridos con una textura superficial rugosa son más difíciles de compactar que los áridos con una textura superficial uniforme. El esfuerzo de compactación requerido también se ve afectado por la forma del árido. Un árido cúbico o en forma de bloque requiere un mayor esfuerzo de compactación que una partícula redondeada antes de alcanzar un determinado nivel de densidad. Un agregado con gradación continua (de tipo densa), desde grueso hasta fino, generalmente es el más fácil de compactar. Las mezclas con gradación abierta o con gradación en capa suelen requerir un esfuerzo de compactación significativamente mayor para alcanzar el nivel de densidad deseado. Una mezcla con exceso de arena o finamente graduada, debido a su naturaleza inherentemente blanda, puede ser difícil de compactar.

Las mezclas que contienen un exceso de árido fino de tamaño medio [entre los tamices de 0,60 y 0,3 mm (n.º 30 y n.º 50) o entre los tamices de 0,425 y 0,180 mm (n.º 40 y n.º 80)] también son difíciles de compactar debido a su falta de cohesión interna. Estas mezclas tienden a desplazarse lateralmente en lugar de comprimirse verticalmente. Además, el contenido de polvo [cantidad de árido que pasa el tamiz de 0,75 mm (n.º 200)] afecta al esfuerzo de compactación necesario. Una mezcla diseñada con un alto contenido de polvo será generalmente más difícil de compactar que una con un contenido de polvo más bajo, dependiendo de la angulosidad y finura de las partículas de polvo.

En general, los áridos con propiedades que mejoran la resistencia a la fatiga y la deformación permanente requieren un mayor esfuerzo de compactación para obtener una densidad deseada.

Cemento asfáltico

El grado y la cantidad de cemento asfáltico usado en una mezcla afectan la capacidad de densificar la mezcla. Un cemento asfáltico de mayor viscosidad o de menor penetración provocará generalmente una mezcla más rígida a una temperatura de mezcla determinada, lo que requerirá un mayor esfuerzo de compactación para alcanzar la densidad. Así, una mezcla producida con un asfalto de viscosidad AC-20 será típicamente más rígida, a una temperatura determinada, que una mezcla similar que contenga un cemento asfáltico AC-10. Dentro del sistema de clasificación de ligantes PG (véase el apartado 3), una mezcla producida con un ligante clasificado PG 70-22 será normalmente más rígida, a una temperatura dada, que una mezcla producida utilizando un material ligante PG 58-22. Cuanto más rígida sea la mezcla, mayor será el esfuerzo de compactación necesario para alcanzar un nivel de densidad dado. Cuanto más rígida sea la mezcla, mayor será el esfuerzo de compactación necesario para alcanzar un determinado nivel de densidad.

El grado de endurecimiento (envejecimiento) que se produce en el ligante asfáltico durante la fabricación de la mezcla también afecta a la compactibilidad de ésta. Los distintos asfaltos envejecen de forma diferente durante el proceso de mezclado, dependiendo, en parte, de las propiedades químicas del cemento asfáltico. El envejecimiento también se ve influido por el tipo y las características de funcionamiento de la planta de MAC - normalmente se producirá más endurecimiento cuando una planta de mezcla de tambor funcione a capacidad parcial que cuando una planta de mezcla de tambor funcione a capacidad parcial que cuando funcione a máxima capacidad. Además, las temperaturas de fabricación más elevadas suelen producir mezclas algo más densas.

El contenido de cemento asfáltico de la mezcla también influye en su compactación. En general, una mezcla con demasiado poco cemento asfáltico puede ser rígida y requerir un mayor esfuerzo de compactación, mientras que una mezcla con demasiado cemento asfáltico se compactará fácilmente o puede volverse blanda y empujar bajo los rodillos.

Propiedades de la mezcla

Una mezcla que esté a una temperatura más alta en el momento de la colocación [por ejemplo, 150°C (300°F)] será más fácil de compactar que una mezcla que esté a una temperatura más baja [por ejemplo, 125°C (260°F)]. Sin embargo, si la temperatura inicial de la mezcla es demasiado alta, la mezcla puede ser blanda y difícil de compactar hasta que la temperatura disminuya y aumente la viscosidad del ligante asfáltico. Por el contrario, si la temperatura de la mezcla es demasiado baja en el momento en que se aplica el esfuerzo de compactación inicial, será necesario aumentar el esfuerzo de compactación para obtener la densidad requerida; de hecho, es posible que nunca se alcance la densidad requerida.

La trabajabilidad de la mezcla también se ve afectada por la susceptibilidad a altas temperaturas (sensibilidad

de la rigidez de la mezcla a la temperatura) del asfalto. Para el ligante asfáltico susceptible a altas temperaturas, habrá menos tiempo disponible para la compactación porque la mezcla aumentará su rigidez más rápido con la disminución de la temperatura que una mezcla que contenga un asfalto susceptible a bajas temperaturas.

El contenido de fluidos de la mezcla también afecta al esfuerzo de compactación necesario. El contenido de fluidos es la suma del contenido de cemento asfáltico y el contenido de humedad de la mezcla. Si la cantidad de humedad de la mezcla procedente de la planta es elevada (superior al 0,2% en peso de la mezcla), el contenido extra de fluidos actuará como ligante asfáltico y puede hacer que la mezcla sea inestable y difícil de compactar. Por ello, debe medirse regularmente el contenido de humedad de la mezcla producida en planta. La mayoría de las especificaciones exigen que el contenido de humedad sea inferior al 0,5%, en peso de la mezcla, cuando ésta se descarga de la planta. Sin embargo, si las características de la mezcla no son óptimas, un contenido de humedad residual de tan sólo el 0,2% puede alterar significativamente la terneza de la mezcla y, por tanto, su compactibilidad.

Variables medioambientales

Las investigaciones realizadas a principios de los años 70 determinaron el tiempo disponible para la compactación de varias mezclas de MAC. El tiempo disponible para la compactación se define como el tiempo, en minutos, que tarda una mezcla en enfriarse desde su temperatura de depósito cuando pasa por debajo de la regla pavimentadora hasta una temperatura mínima de compactación. La temperatura mínima de compactación para ese estudio se fijó en 80°C (175°F). Se comprobó que, por debajo de esta temperatura, se conseguía poco aumento de densidad con la aplicación de un esfuerzo de compactación adicional. Cualquier rodadura adicional con rodillos de rueda de acero, excepto para eliminar las marcas de los rodillos, puede provocar la fractura del árido en la mezcla y una disminución de la densidad. Sin embargo, se hace hincapié en que la rodadura debe producirse a una temperatura lo más alta posible, dadas las propiedades de la mezcla asfáltica, con el fin de alcanzar el nivel de densidad requerido con el mínimo esfuerzo de compactación. A temperaturas cercanas a los 80°C (175°F), la probabilidad de aumentar significativamente la densidad o reducir los vacíos de aire es muy baja. Esta temperatura de corte inferior puede variar algo con los grados de asfalto.

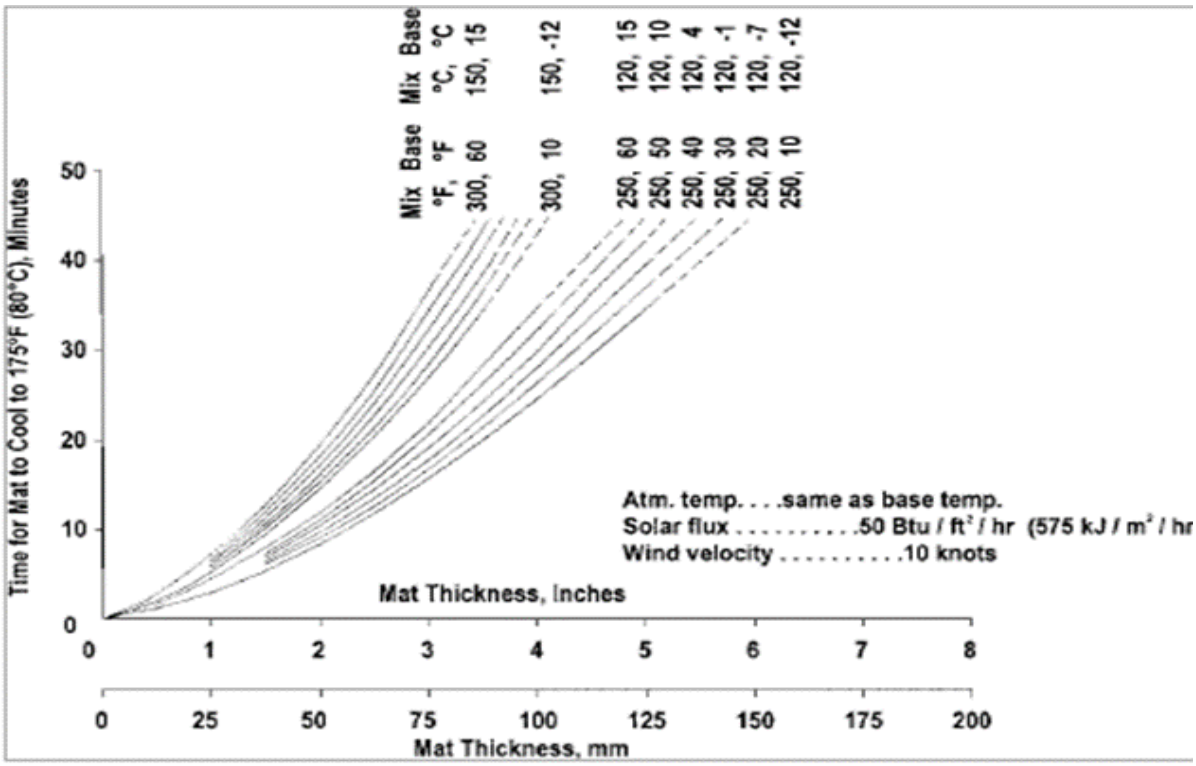


FIGURA 18-1 Tiempo de enfriamiento de la capa a 80˚C (175˚F) en función del espesor de la capa para líneas de mezcla constante y temperaturas de base [121˚C (250˚F) o 149˚C (300˚F) detrás de la pavimentadora

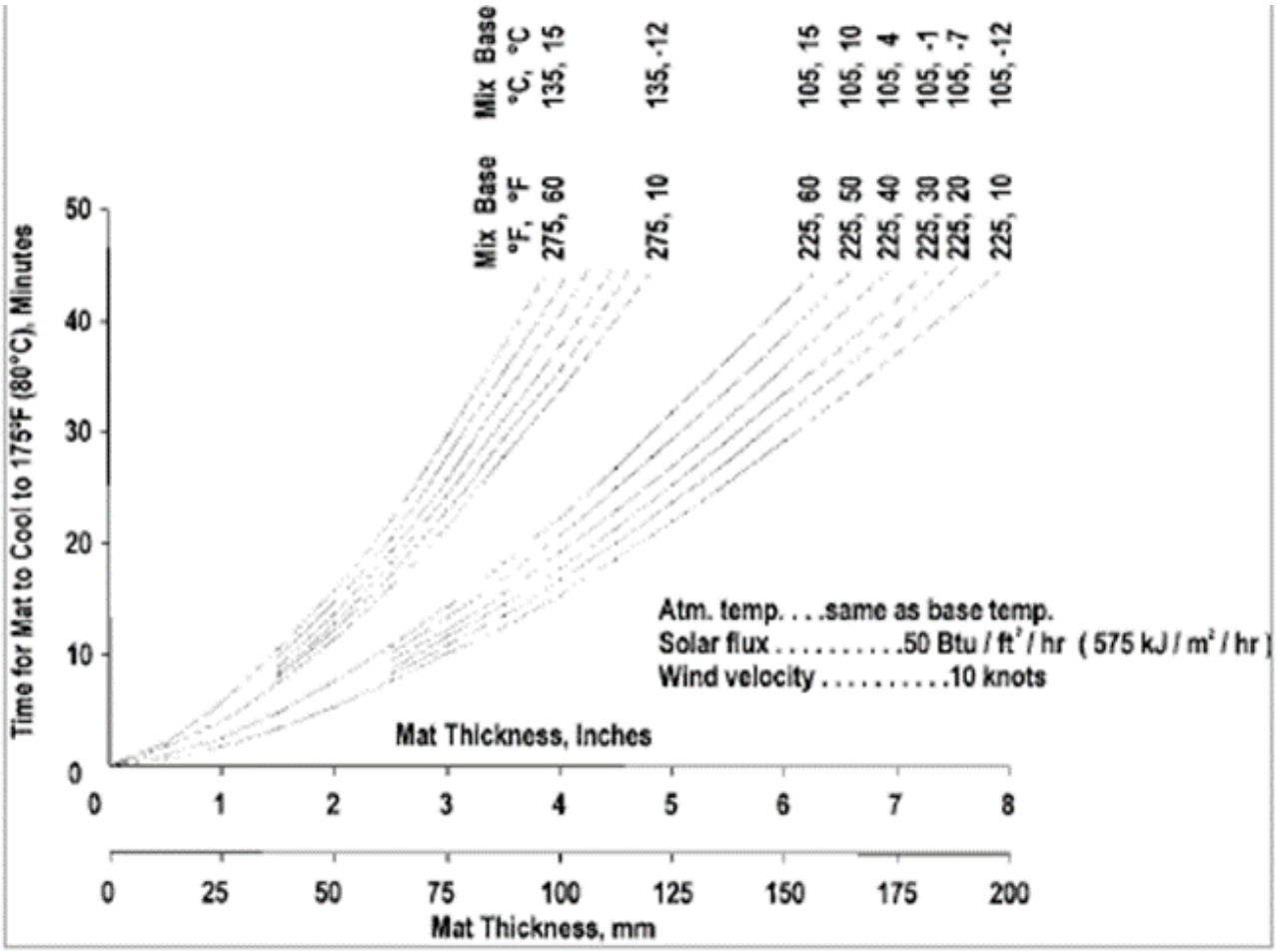


FIGURA 18-2 Tiempo para que la capa se enfríe a 80˚C (175˚F) versus espesor de la capa para líneas de mezcla constante y temperaturas de base [107˚C (225˚F) detrás de la pavimentadora.

En el estudio de los años setenta, se comprobó que seis variables influían en la velocidad de enfriamiento: el espesor de la capa, la temperatura del aire, la temperatura de la base, la temperatura de depósito de la mezcla, la velocidad del viento y la radiación solar. Las "curvas de enfriamiento", mostradas en las Figuras 18-1 y 18-2, ilustran la cantidad de tiempo disponible para la compactación bajo diferentes combinaciones de estas variables. Para estas dos figuras, se supone que el material que se está compactando es una mezcla de MAC de granulometría densa. Se supone que la temperatura superficial del pavimento subyacente es igual a la temperatura ambiente del aire. Una velocidad constante del viento de 10 nudos [unos 18 km/h (11 mph)] y un grado constante de radiación solar. Las curvas muestran el tiempo estimado, en minutos, necesario para que la mezcla se enfríe desde su temperatura de depósito hasta la temperatura mínima de compactación de 80°C (175°F) para diferentes espesores de capa compactada.

Para utilizar estos gráficos, se necesitan tres variables de entrada: temperatura inicial de colocación de la mezcla, temperatura de la superficie de la base (que se supone igual a la temperatura del aire ambiente) y espesor de la capa compactada. La figura 18-1 debe utilizarse para temperaturas de colocación de la mezcla de 121°C y 149°C (250°F y 300°F). La figura 18-2 se debe utilizar cuando la temperatura de colocación de la mezcla es de 107°C o 135°C (225°F o 275°F). El rango de temperaturas base para cada conjunto de curvas es de -12°C a 15°C (10°F a 60°F). El rango de espesores de capa de mezcla es de 13 a 150 mm (1⁄2 a 6 pulg.).

Espesor de la capa

El espesor de la capa es probablemente la variable más importante en la tasa de enfriamiento de las mezclas asfálticas. Durante el comienzo de la primavera y el final del otoño, es difícil compactar adecuadamente las capas finas. Las capas de mezcla de menos de 50 mm (2 pulg.) de espesor compactado son muy susceptibles de fallar prematuramente debido a la incapacidad de densificar la mezcla adecuadamente antes de que se enfríe. La densidad deseada es muy difícil de obtener en capas finas de
mezcla en tiempo frío debido al rápido descenso de la temperatura de la mezcla. A medida que aumenta el espesor de la capa colocada, aumenta también el tiempo disponible para la compactación. Por ejemplo, refiriéndonos a la Figura 18-1, para una temperatura de colocación de la mezcla de 121°C (250°F) y una temperatura base de 5°C (40°F), una capa de 25 mm (1 in.) de espesor se enfriará hasta el punto de temperatura de corte de compactación de 80°C (175°F) en menos de 4 minutos. Para una capa de 50 mm (2 in.) de espesor en las mismas condiciones de mezcla y temperatura de la base, el material tardará unos 10 minutos en enfriarse hasta los 80°C (175°F). Duplicando el espesor de la capa de 25 a 50 mm (1 a 2 pulg.) se aumenta el tiempo disponible para la compactación de 4 a 10 minutos. Si la profundidad de la capa es de 100 mm (4 pulg.), el tiempo de enfriamiento pasa a ser de unos 29 minutos, lo que supone un aumento significativo del tiempo de compactación disponible en condiciones de temperatura similares.

En la Figura 18-1, el efecto relativo del espesor de levantamiento del pavimento es el mismo para una temperatura de colocación de la mezcla de 149°C (300°F) y una temperatura de base de 5°C (40°F). A medida que la profundidad disminuye de 100 a 50 a 25 mm (4 a 2 a 1 pulg.), el tiempo disponible para que la mezcla se enfríe de 149°C (300°F) a 80°C (175°F) disminuye de más de 40 a 16 a sólo 6 minutos, respectivamente. De estos datos se desprende que el tiempo disponible para compactar una capa fina de HMA es extremadamente limitado en tiempo frío.

Aire y temperatura base

Una parte del calor de la capa de asfalto se pierde en el aire. El calor también se pierde en la capa sobre la que se coloca el nuevo material. El enfriamiento de la mezcla cerca de la base es más rápido que cerca de la superficie. Por lo tanto, la temperatura de la base es más importante que la temperatura del aire a la hora de determinar el tiempo disponible para la compactación.

La mayoría de las especificaciones exigen una temperatura mínima del aire para las operaciones de extendido y compactación. A menudo se supone que la temperatura del aire y la de la base son iguales. Esto no es necesariamente cierto, sobre todo cuando hace frío. A principios de primavera, la temperatura base (temperatura de la superficie de una capa de pavimento existente) será inferior a la temperatura ambiente del aire a primera hora de la mañana. La temperatura del aire puede ser de 5°C (40°F) y subiendo, pero la temperatura de la base puede ser de 3°C a 6°C (5°F a 10°F) por debajo de la temperatura del aire. La baja temperatura base reducirá el tiempo disponible para alcanzar la densidad adecuada. Por otra parte, las temperaturas de la base suelen ser más altas a finales de otoño que a principios de primavera para una misma temperatura del aire durante la noche. Por lo tanto, un espesor determinado de material es más fácil de compactar en otoño que en primavera para las mismas condiciones de temperatura del aire.

Una capa de base húmeda aumenta significativamente la velocidad de enfriamiento de la nueva capa de asfalto superpuesta. El calor se pierde de la mezcla a la humedad, convirtiendo el agua en vapor y aumentando la tasa de transferencia de calor. Por tanto, pavimentar sobre una superficie húmeda dificulta la capacidad de obtener la densidad adecuada en la mezcla.

El tiempo que tarda la mezcla en enfriarse desde la temperatura de colocación hasta 80°C (175°F) también aumenta a medida que aumenta la temperatura del aire ambiente y de la superficie del pavimento existente. En la Figura 18-2, para una temperatura de mezcla de 135°C (275°F) y un espesor de elevación de 75 mm (3 in.), sólo se necesitan 22 minutos para que la mezcla se enfríe cuando las temperaturas de la base y del aire son de -7°C (20°F). El tiempo disponible se amplía ligeramente a 25 minutos para una base/aire de 15°C (60°F).

De nuevo refiriéndose a la Figura 18-2, para un espesor de levantamiento de 50 mm (2 in.), usando la misma temperatura de colocación de la mezcla de 135°C (275°F), el tiempo para enfriar a 80°C (175°F) aumenta de 11 a 13 a 15 minutos para una temperatura base/aire de -7°C, 5°C, y 15°C (20°F, 40°F, y 60°F), respectivamente. Por lo tanto, la temperatura del aire ambiente y de la superficie de la base es importante, aunque no tanto como el grosor de la estera, para determinar el tiempo disponible para la compactación.

Temperatura de preparación de la mezcla

Las mezclas asfálticas se producen normalmente a temperaturas entre 130°C y 165°C (270°F y 325°F). Dependiendo de las condiciones ambientales y de la longitud del transporte, la temperatura de la mezcla puede disminuir de 3°C a 14°C (5°F a 25°F) entre la planta y la pavimentadora. La temperatura de mezcla de la planta no es importante para determinar el tiempo disponible para la compactación, pero sí lo es la temperatura de la mezcla cuando sale de debajo de la regla de la pavimentadora. Al aumentar la temperatura

inicial de la mezcla, aumenta también el tiempo disponible para la compactación. Así pues, dentro de unos límites, la temperatura de mezcla debe determinarse en función de los requisitos de temperatura de depósito y compactación.

En referencia a la figura 18-1, para un espesor de levantamiento de 50 mm (2 pulg.) y una temperatura base/aire de 5°C (40°F), el tiempo de enfriamiento a 80°C (175°F) aumenta de 9 a 16 minutos a medida que la temperatura de reposo aumenta de 121°C (250°F) a 149°C (300°F). Para un espesor de elevación de 100 mm (4 pulg.) y una temperatura base/aire de 15 °C (60 °F), un cambio en la temperatura de colocación de 149 °C (300 °F) a 121 °C (250 °F) reduce el tiempo disponible para la compactación de 36 a 21 minutos.

El efecto de la temperatura de colocación de la estera es más significativo en el caso de esteras más finas y temperaturas de base más bajas. A medida que el tiempo de enfriamiento a 80°C (175°F) se acorta, un aumento de la temperatura de depósito de la mezcla prolonga significativamente el tiempo de compactación en la mayoría de los casos.

Velocidad del viento

Una capa fina de mezcla se enfriará más rápidamente cuando sople un viento fuerte que cuando sople poco o nada. El viento tiene un efecto mayor en la superficie de la mezcla que en el interior y puede hacer que la superficie se enfríe tan rápidamente que se forme una costra. Los rodillos deben romper esta costra antes de que pueda comenzar el proceso de compactación. La velocidad del viento es más preocupante para las capas finas de mezcla colocadas en tiempo fresco que para las capas más gruesas colocadas en tiempo más cálido.

Flujo solar

La cantidad de energía radiante disponible procedente del sol (flujo solar) depende de muchas variables, como la posición del sol sobre el horizonte, la distancia sobre el nivel del mar del proyecto de pavimentación, la cantidad de bruma en el aire y el grado de nubosidad. Una mezcla se enfriará más lento en un día soleado que en uno nublado. La cantidad de flujo solar influye más en la temperatura base que en la temperatura de la mezcla. Para una temperatura ambiente dada, la temperatura de base será más alta en un día soleado que en un día muy nublado. La temperatura de base más alta reducirá la velocidad de enfriamiento de la mezcla y aumentará el tiempo disponible para la compactación.

Obtención de la densidad adecuada en condiciones ambientales variables

La compactación de la mezcla asfáltica requiere sentido común. Si el espesor de la capa, el aire y la temperatura base, la temperatura de extendido o el flujo solar disminuyen o el viento aumenta, se dispondrá de menos tiempo para obtener el nivel de densidad requerido antes de que la mezcla se enfríe a 80°C (175°F). Por lo tanto, un cambio significativo en cualquiera de estos factores puede marcar la diferencia entre construir un pavimento duradero y construir uno que estará sujeto a un fallo prematuro.

Si es posible, la mejor solución a un posible problema de compactación es aumentar el espesor del material colocado. Una capa de 25 mm (1 pulg.) de espesor se enfría tan rápidamente, incluso en buenas condiciones ambientales, que es difícil obtener una den-sidad adecuada. El espesor mínimo de capa que debe especificarse en las mejores circunstancias es de 38 mm ($1^1/_2$ pulg.). Para la pavimentación realizada a principios de primavera o finales de otoño, se deben colocar al menos 50 mm (2 pulg.) de mezcla asfáltica compactada en una sola elevación, si es posible.

La solución más sencilla a un posible problema de disponibilidad de tiempo es aumentar la temperatura de descarga de la mezcla asfáltica en la planta, si al hacerlo no se producen otros problemas con la mezcla. Una mayor temperatura de descarga permitirá aumentar la temperatura de extendido de la mezcla detrás de la regla pavimentadora, dejando así más tiempo para que la mezcla se enfríe a 80°C (175°F), manteniéndose constantes todos los demás factores. También es importante recordar que a medida que aumenta la temperatura, aumenta el envejecimiento del ligante y la absorción, por lo que el aumento de la temperatura de la mezcla requiere una consideración cuidadosa. Sin embargo, el aumento de la temperatura de la mezcla puede no ser suficiente para proporcionar el tiempo adecuado para la compactación en condiciones ambientales adversas y para capas finas de material. Si la temperatura de la mezcla se aumenta demasiado, la mezcla puede ablandarse bajo el equipo de compactación, y el humo u otras emisiones pueden convertirse en un problema. La mezcla debe dejarse enfriar antes de iniciar el proceso de compactación. Por lo tanto, existe un límite máximo para el aumento de temperatura al que puede someterse la mezcla.

El esfuerzo de compactación puede aumentarse simplemente utilizando más rodillos para compactar la capa de firme. Además, los rodillos más anchos o pesados pueden sustituirse por equipos más estrechos o ligeros. Un rodillo vibratorio de doble tambor, por ejemplo, de 2,1 m (7 pies) de ancho puede utilizarse en lugar de un rodillo estático tándem de ruedas de acero de sólo 1,4 m ($4^1/_2$ pies) de ancho.

Otra forma de conseguir los niveles de compactación deseados es utilizar el equipo de compactación de forma eficaz. Dependiendo del ancho del pavimento y del ancho de los rodillos, éstos pueden colocarse casi

uno al lado del otro en lugar de uno al lado del otro. Dos rodillos trabajando de esta manera pueden cubrir un área dada mucho más rápidamente que dos rodillos trabajando de la manera convencional. La densidad aumentará porque se puede aplicar un mayor esfuerzo de compactación antes de que la capa asfáltica se enfríe a 80°C (175°F). En esencia, este método prevé dos rodillos de desglose en lugar de un rodillo de desglose y un rodillo intermedio. Sin embargo, para obtener los niveles de densidad requeridos, puede seguir siendo necesario utilizar uno o varios rodillos intermedios. Aumentar la velocidad de los rodillos no es un buen medio para mejorar la compactación. Dos pasadas a alta velocidad son menos eficaces que una pasada a la mitad de velocidad.

Si se utilizan dos tipos o tamaños diferentes de rodillos (como un rodillo vibratorio y un rodillo neumático), es importante que cada rodillo cubra toda la superficie de la mezcla. Esto puede significar que los rodillos deben cruzarse de un lado a otro y ejecutar diferentes patrones de rodillos y números de pasadas. Además, si uno de los rodillos está compactando una junta longitudinal, esto debe tenerse en cuenta al establecer el patrón de rodadura para cada pieza del equipo de compactación. Es muy importante que todos los rodillos puedan mantener la velocidad de la pavimentadora y que se mida la densidad obtenida para garantizar que se alcanza el nivel de compactación requerido de manera uniforme en todo el ancho de la capa.

Un procedimiento que no debe utilizarse en un intento de aumentar el nivel de densidad de la mezcla es aumentar arbitrariamente el contenido de cemento asfáltico de la mezcla. Aunque el cemento asfáltico adicional puede ser beneficioso para aumentar la trabajabilidad de la mezcla, va en contra del propósito del diseño de la mezcla y se ha relacionado con problemas de rendimiento a largo plazo de la mezcla bajo tráfico, como formación de surcos y empujones.

Condiciones del lugar de extendido

Hay una serie de factores en el lugar de extendido que afectan directamente a la capacidad del equipo de compactación para crear el nivel requerido de densidad del pavimento. Como se ha comentado anteriormente, el más importante de estos factores es el espesor de la capa colocada. La relación entre el espesor de la capa y el tamaño máximo nominal del árido en la mezcla también es importante. Si la profundidad de la capa es al menos tres veces el tamaño máximo nominal del árido, se puede conseguir una densidad adecuada con un esfuerzo de compactación normal.

La uniformidad del espesor de la capa es otro factor a tener en cuenta. La densidad es mucho más fácil de obtener en una capa de asfalto que tiene un espesor constante en comparación con una que varía en profundidad. Una capa de espesor variable suele ser difícil de densificar uniformemente hasta un contenido determinado de vacíos de aire, especialmente cuando se coloca sobre una superficie de pavimento bacheada o irregular. Los rodillos estáticos con ruedas de acero tienden a puentearse sobre las roderas, especialmente si éstas son relativamente profundas y estrechas. Los rodillos vibratorios tienden a apoyarse en los puntos altos de la superficie, aunque la acción vibratoria tiene cierto efecto beneficioso en la compactación de la mezcla en las roderas. Por lo tanto, no se suele obtener una densidad adecuada en toda la mezcla con los rodillos de ruedas de acero, especialmente en las zonas con surcos, que es donde más se necesita. El uso de un rodillo neumático es muy útil para conseguir densidad tanto en los surcos como en los puntos altos si se utilizan la presión de inflado de neumáticos y la carga de ruedas adecuadas.

Equipo de compactación

El tipo de equipo utilizado para compactar la mezcla asfáltica tiene obviamente un efecto significativo en la densidad que puede obtenerse con un número determinado de pasadas. Actualmente se utilizan tres tipos principales de equipos de compactación autopropulsados: rodillos estáticos de ruedas de acero, rodillos neumáticos y rodillos vibratorios de ruedas de acero. A veces también se utiliza un rodillo combinado, equipado con un tambor vibratorio y un juego de cuatro ruedas neumáticas.

Rodillos estáticos de ruedas de acero

Los rodillos estáticos de ruedas de acero, que se muestran en la Figura 18-3, suelen pesar entre 2,7 y 12,7 toneladas (3 a 14 toneladas) y tienen tambores de compresión cuyo diámetro varía entre aproximadamente 1,0 m (3,3 pies) y más de 1,5 m (5 pies). Por lo general, el peso bruto del rodillo puede modificarse añadiendo lastre, pero este ajuste no puede hacerse mientras el rodillo está en funcionamiento y normalmente no se realiza durante el transcurso de un proyecto de pavimentación. Para este tipo de rodillo, tanto el peso bruto de la máquina como el área de contacto de los tambores con la mezcla son importantes para determinar el esfuerzo de compactación aplicado por el rodillo a la superficie de la nueva capa/estera.

La presión de contacto efectiva, en términos de kilopascales (kPa) [libras-fuerza por pulgada cuadrada (psi)] sobre el área de contacto, es la variable clave para este tipo de equipo y depende de la profundidad de penetración de los tambores en la mezcla - cuanto mayor es la profundidad de penetración, mayor es el área de contacto y, por tanto, menor es la presión de contacto. Así, en la primera pasada del rodillo, cuando la penetración de los tambores en la mezcla es mayor, el

FIGURA 18-3 Rodillo estático de rueda de acero.

FIGURA 18-4 Rodillo de neumáticos.

rodillo ejerce menos esfuerzo de compactación sobre la mezcla. En las pasadas siguientes, a medida que la mezcla se hace más densa, los tambores penetran menos y aumenta el esfuerzo de compactación del rodillo.

La fuerza de tracción se define como la fuerza horizontal necesaria para hacer avanzar el rodillo. El rodillo más eficaz es el que tiene la menor fuerza de tracción. Los rodillos con tambores de gran diámetro tienen menor tracción en la lanza (resistencia a la rodadura) porque no tienden a penetrar tanto en la mezcla para desarrollar un área de contacto como un rodillo con tambores de menor diámetro.

Una vez seleccionados el tamaño y el peso de un rodillo estático de ruedas de acero, las variables bajo el control del operador del rodillo son la velocidad del rodillo, la posición del rodillo sobre la capa en relación con la pavimentadora, el funcionamiento con la rueda motriz o el tambor hacia la pavimentadora y el número de pasadas realizadas con el rodillo sobre cada punto de la superficie del pavimento.

Rodillos neumáticos

Los rodillos neumáticos suelen utilizarse en la posición de rodillo intermedio, detrás de un rodillo de desglose vibratorio o de rueda de acero estática y delante de un rodillo de acabado de rueda de acero estática. Sin embargo, los rodillos neumáticos se utilizan a veces para la rodadura inicial de la mezcla y, ocasionalmente, para la rodadura de acabado. Para un rodillo neumático, mostrado en la Figura 18-4, el esfuerzo de compactación aplicado a la mezcla es una función de la carga de la rueda de la máquina, la presión del neumático, el diseño del neumático (tamaño del neumático y clasificación de la capa), y la profundidad de penetración de los neumáticos en la mezcla. Todos los neumáticos del rodillo deben ser del mismo tamaño, lonas y presión. El área de la huella de cada neumático y la carga de la rueda del rodillo son los factores principales en la eficacia de un rodillo neumático. Cuanto mayor sea la presión de contacto entre el neumático y la mezcla, mayor será el esfuerzo de compactación aplicado por el rodillo.

Para que sean eficaces en la posición de rodillo de apoyo, deben utilizarse rodillos con neumáticos más grandes. Los rodillos equipados con neumáticos de 7,50 × 15 o inferiores no suelen ser eficaces como rodillos de apoyo. Si se utilizan rodillos de neumáticos como rodillos intermedios, el número mínimo de lonas debe ser 12 y la presión de los neumáticos debe ser de 400 kPa (60 psi) o superior.

La presión de los neumáticos depende en parte del número de capas que tengan. En general, un neumático de 6 capas está limitado a una presión de 400 kPa (60 psi), mientras que un neumático de 10 capas puede soportar una presión de hasta 600 kPa (90 psi). Un neumático de 12 capas, normalmente utilizado en la mayoría de los grandes compactadores de neumáticos, puede inflarse hasta 800 kPa (120 psi) para compactar mezclas asfálticas. El peso mínimo del compactador de neumáticos debe ser de 13,6 toneladas (15 toneladas).

Si la mezcla es blanda, el uso de una presión de neumáticos más baja desplazará la mezcla menos que el uso de una presión más alta. Para una mezcla rígida, se puede utilizar una presión de neumáticos más alta porque la mezcla será lo suficientemente estable como para soportar el peso del rodillo sin empujar lateralmente bajo los neumáticos. La presión de los neumáticos se mantiene normalmente constante para un proyecto dado, pero el nivel seleccionado debe depender de las propiedades de la mezcla que se está compactando y de la posición del rodillo en la estera/capa. La presión de los neumáticos no debe ser necesariamente la misma si el compactador de neumáticos se utiliza en la posición de desglose que si se utiliza en la posición intermedia. A menudo se puede emplear una presión de neumáticos más alta cuando el compactador de neumáticos se utiliza en la posición intermedia porque la mezcla debería ser más rígida a las temperaturas más bajas en esta etapa del proceso y, por lo tanto, puede soportar un mayor esfuerzo de compactación sin distorsión.

Las llantas del rodillo neumáticos levantaran la mezcla si el rodillo se mueve en la mezcla cuando los neumáticos están fríos. Los neumáticos también levantaran a menudo la mezcla cuando se está

compactando una mezcla de capa superficial con exceso de arena. La recogida también puede ser un problema importante cuando la mezcla se ha modificado con aditivos poliméricos. Si la mezcla contiene un aditivo de caucho, el problema de recogida puede ser tan grave que no se pueda utilizar este tipo de rodillo. Si la recogida de la mezcla en los neumáticos resulta ser un problema importante, debe determinarse si la mezcla contiene un material ligante modificado, aunque si el cemento asfáltico ha sido formulado para cumplir con un grado de ligante PG, el proveedor del ligante puede no estar dispuesto a revelar su composición por razones de propiedad.

Con frecuencia se intenta eliminar el problema del levantamiento rociando agua o un agente desmoldeante sobre los neumáticos durante el proceso de rodadura. Esta práctica no siempre resuelve el problema. Si el rodillo no está dañando la estera, una mejor solución es permitir que los neumáticos del rodillo alcancen la misma temperatura que la mezcla que se está compactando sin rociar agua o agente de liberación en los neumáticos. El levantamiento se reducirá al mínimo o se eliminará. A veces se cuelgan de los lados del rodillo, alrededor de las llantas, faldones que consisten en trozos de madera contrachapada o láminas de caucho, como se muestra en la Figura 18-5, para proteger las llantas del viento y evitar que se enfríen. Este método es eficaz, especialmente en días ventosos y frescos.

Si se va a utilizar un rodillo neumático como rodillo de desguace en el tren de rodillos al comienzo de la pavimentación por la mañana, se sugiere que, para minimizar la recogida, el rodillo se haga funcionar de un lado a otro durante 10 a 15 minutos sobre el pavimento frío antes de que la pavimentadora comience a extender la mezcla, con el fin de empezar a acumular calor en los neumáticos.

FIGURA 18-5 Rodillo neumático con faldones.

Una vez iniciada la pavimentación, el rodillo debe operarse en posición intermedia, detrás de una rueda de acero estática o de un rodillo vibratorio, durante otros 10 minutos mientras la temperatura de los neumáticos aumenta hasta el mismo nivel que la de la mezcla. Durante este tiempo de calentamiento no debe aplicarse agua ni desmoldante a los neumáticos.

Durante el proceso de calentamiento, es posible que se produzca cierta captación de la mezcla en los neumáticos. Sin embargo, una vez que los neumáticos hayan alcanzado la misma temperatura que la mezcla, la cantidad de recogida disminuirá. En este momento, el rodillo debe retirarse brevemente de la vía de pavimentación, los neumáticos deben limpiarse rápidamente y el rodillo debe volver a colocarse sobre la mezcla caliente. A continuación, el rodillo de neumáticos puede colocarse en posición de descanso y debería poder funcionar correctamente sin recoger la mezcla. Sin embargo, si el proceso de extendido se interrumpe durante un periodo de tiempo significativo, será necesario repetir este procedimiento de precalentamiento. En ningún caso debe estacionarse el compactador de neumáticos sobre la estera caliente para intentar mantener calientes los neumáticos mientras se espera a que se reinicie la operación de pavimentación.

Una vez seleccionados el tamaño del compactador de neumáticos y la presión de los neumáticos a utilizar, las únicas variables que el operador puede controlar fácilmente son la velocidad de rodadura, la ubicación del compactador con respecto a la pavimentadora y el número de pasadas del compactador sobre cada punto de la superficie del pavimento. Si el esfuerzo de compactación aplicado por el rodillo de neumáticos no es el adecuado, el operador deberá modificar la carga de las ruedas o cambiar la presión de inflado, o ambas cosas.

Rodillos vibratorios

Los rodillos vibratorios (ver Figura 18-6) vienen en una variedad de configuraciones. Los rodillos vibratorios de tambor simple se fabrican con bastidor rígido y articulado. Los rodillos vibratorios de doble tambor vienen con bastidores rígidos, articulados simples y articulados dobles. Estos rodillos pueden funcionar en cualquiera de los tres modos siguientes: estático (con los vibradores apagados), con un tambor vibrando y otro estático, y con ambos tambores vibrando.

Los rodillos vibratorios aplican dos tipos de esfuerzo de compactación al MAC: el peso estático y la fuerza dinámica (de impacto). El esfuerzo de compactación derivado del peso estático del rodillo es causado por el peso de los tambores y el bastidor. El esfuerzo de compactación derivado de la fuerza dinámica es producido por una pesa excéntrica giratoria situada en el interior del tambor (o tambores). A medida que la pesa excéntrica gira alrededor del eje situado en el interior del

tambor, se produce una fuerza dinámica. Esta fuerza es proporcional al momento excéntrico de las pesas giratorias y a la velocidad de rotación. Cambiar el brazo del momento excéntrico o ajustar la masa excéntrica tiene un efecto directamente proporcional en la fuerza dinámica.

Aunque es posible combinar el peso estático y la fuerza dinámica para determinar una fuerza aplicada total, no se recomienda este procedimiento para comparar rodillos vibratorios de la misma clase o de clases diferentes. Más bien, los componentes de la fuerza total aplicada deben evaluarse por separado. Los elementos de comparación para el componente dinámico de un rodillo vibratorio son la magnitud de la fuerza centrífuga, su frecuencia de vibración, la amplitud nominal y la relación entre las masas vibrantes y no vibrantes que actúan sobre el tambor. La amplitud nominal se define como el peso del tambor dividido por el momento excéntrico del peso giratorio y es función del peso del tambor y de la ubicación de las excéntricas.

Los valores normales de amplitud nominal oscilan entre 0,25 y 1,02 mm. Algunos rodillos sólo pueden funcionar con una amplitud fija. Otros tienen posiciones de amplitud alta y baja. En estos rodillos, la posición nominal baja suele ser el 50% de la posición alta. En algunos rodillos vibratorios, pueden seleccionarse varias (hasta ocho) posiciones de amplitud diferentes. La amplitud real difiere de la amplitud nominal debido a la variación del efecto de amortiguación de los distintos materiales en diferentes estados de compactación. Un aumento de la amplitud nominal de vibración aplicada incrementa el esfuerzo de compactación aplicado a la mezcla asfáltica. Para una frecuencia dada, la modificación del ajuste de la amplitud tiene un efecto proporcional sobre la fuerza dinámica. Para una amplitud dada, el cambio de la frecuencia influye en la fuerza dinámica a la segunda potencia.

Sin embargo, la eficacia de un aumento del valor de amplitud depende a veces del espesor de la capa que se está densificando. Para capas de mezcla relativamente finas, generalmente de menos de aproximadamente 30 mm (1 $^1/_4$ pulg.) de espesor compactado, el rodillo vibratorio debe funcionar normalmente en modo estático: -sin vibración. De lo contrario, a medida que la mezcla se densifica bajo el esfuerzo de compactación aplicado por el rodillo vibratorio, los tambores comenzarán a rebotar. Esto, a su vez, puede hacer que la mezcla empuje y se descompacte en lugar de densificarse, dependiendo en parte de la rigidez de la estructura del pavimento subyacente. Además, cuando el rodillo funciona en modo vibratorio en una capa fina, parte del árido de la mezcla se aplasta.

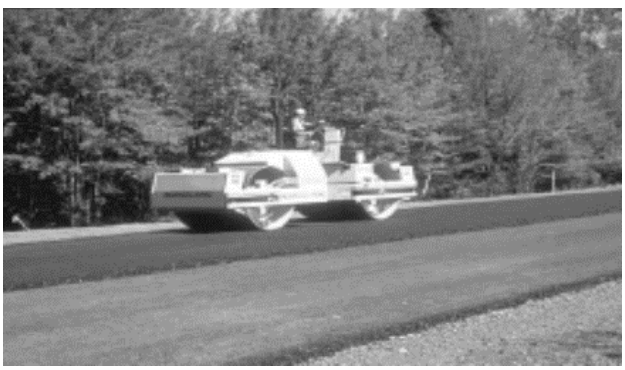


FIGURA 18-6 Rodillo vibratorio de rueda de acero.

En general, para capas con un espesor de 30 mm (1$^1/_4$ pulg.) o más, debe utilizarse un ajuste de baja amplitud en el rodillo vibratorio. Este ajuste debe mantenerse a menos que el espesor compactado de la capa sea de al menos 65 mm (2 $^1/_2$ pulg.). A medida que el espesor de la capa aumenta por encima de este nivel, el ajuste de amplitud del rodillo puede aumentarse generalmente para incrementar el esfuerzo de compactación aplicado a la mezcla. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que muy pocas capas de MAC tienen más de 65 mm (2 $^1/_2$ pulg.) de espesor compactado.

Si hay problemas para conseguir densidad rápidamente, los operadores de rodillos a veces aumentan el ajuste de amplitud del rodillo. Esta no es necesariamente la práctica correcta. En la mayoría de los casos, en particular para elevaciones de 65 mm (2$^1/_2$pulg.) o menos, el aumento de la fuerza aplicada puede hacer que el árido de la mezcla se fracture y, de hecho, reduzca la densidad en lugar de aumentarla. La mejor práctica es aumentar el número de pasadas realizadas sobre la mezcla con el rodillo vibratorio operado en el ajuste de amplitud baja. El rodillo vibratorio debe funcionar a baja amplitud a menos que se necesite una amplitud alta para alcanzar un nivel de densidad determinado. Si es así, la mezcla debe ser lo suficientemente rígida e internamente estable como para soportar el esfuerzo de compactación añadido sin que se produzcan grietas en la mezcla ni fracturas en los áridos.

La frecuencia de vibración es el número de rotaciones completas por minuto de los excéntricos (componentes del rodillo vibratorio (como los neumáticos o los tambores) que están diseñados de manera que su centro de rotación no coincide con el centro geométrico del rodillo): cuanto más rápida es la rotación, mayor es la frecuencia. Algunos rodillos vibratorios sólo pueden funcionar con una frecuencia; otros pueden elegir entre dos o más frecuencias. La mayoría de los rodillos vibratorios más antiguos pueden funcionar con frecuenciascomprendidas entre 1.600 y 2.400 vibraciones por minuto, mientras que los rodillos más nuevos pueden funcionar hasta a 3.600 vibraciones por minuto. En general, para aplicar un esfuerzo de compactación adecuado a la MAC sin introducir ondulaciones o rugosidades en la superficie de la capa, un rodillo vibratorio debe funcionar a una frecuencia de al menos 2.000 vibraciones por minuto. Además, con

pocas excepciones, el rodillo vibratorio debe funcionar a una frecuencia lo más alta posible. El espaciado de los impactos depende de la frecuencia de la vibración y de la velocidad de desplazamiento del rodillo. A medida que disminuye la frecuencia y aumenta la velocidad del rodillo, aumenta la distancia entre impactos en la superficie de la mezcla. A la inversa, un aumento de la frecuencia de vibración y una disminución de la velocidad del rodillo hacen que aumente el número de impactos por pie de distancia, aumentando así el esfuerzo de compactación aplicado por el rodillo. Normalmente se prefiere una menor distancia entre impactos (un mayor número de impactos por pie). Sin embargo, hay que tener en cuenta que la productividad del rodillo puede disminuir a medida que se reduce su velocidad.

Varios fabricantes de rodillos sugieren que el espaciado de impacto ideal está en el rango de 30 a 40 impactos por metro (10 a 12 impactos por pie) con el fin de proporcionar un equilibrio entre la productividad del rodillo y la suavidad de la capa. Este espaciado puede determinarse dividiendo la velocidad del rodillo por la frecuencia de las vibraciones: espaciado de impactos = velocidad del rodillo en metros (pies) por minuto, dividido por la frecuencia de las vibraciones. Una fuerza aplicada de 30 impactos por metro equivale aproximadamente a 33 mm entre impactos, mientras que 40 impactos por metro equivale a 25 mm entre impactos (una fuerza aplicada de 10 impactos por pie equivale a 1,2 pulg. entre impactos, mientras que 12 impactos por pie equivale a 1,0 pulg. entre impactos).

A una frecuencia de 2.400 vibraciones por minuto, una velocidad del rodillo de aproximadamente 4,8 km/h (80 m/min) dará como resultado una separación de impacto de 33 mm (30 impactos por metro), y una velocidad del rodillo de aproximadamente 3. A una frecuencia de vibración de 2.400 vibraciones por minuto, una velocidad del rodillo de aproximadamente 4,8 km/h (60 m/min) dará como resultado una distancia de impacto de 33 mm (30 impactos por metro), y una velocidad del rodillo de aproximadamente 3,6 km/h (60 m/min) dará como resultado una distancia de impacto de 25 mm (40 impactos por metro) (a una frecuencia de vibración de 2.400 vibraciones por minuto, una velocidad del rodillo de aproximadamente 2,7 mph dará como resultado una distancia de impacto de 10 impactos por pie, y una velocidad del rodillo de aproximadamente 2,3 mph dará como resultado una distancia de impacto de 12 impactos por pie). Si la frecuencia vibratoria se fija en 3.000 vibraciones por minuto, las velocidades correspondientes de los rodillos serán de aproximadamente 5,6 y 4,2 km/h para espaciamientos de impacto de 30 y 40 impactos por metro, respectivamente (si la frecuencia vibratoria se fija en 3.000 vibraciones por minuto, las velocidades correspondientes de los rodillos serán de aproximadamente 3,4 y 2,8 mph para un espaciamiento de impacto de 10 y 12 impactos por pie, respectivamente).

Como ya se ha indicado, el rodillo vibratorio debe funcionar generalmente a una frecuencia lo más alta posible. Un rodillo con una capacidad de 2.000 a 2.400 vibraciones por minuto, por ejemplo, debe funcionar en el extremo superior de esta gama de frecuencias. El uso de la frecuencia de vibración más alta posible aumenta el número de impactos por metro (pie) a una velocidad dada del rodillo. En la gran mayoría de los proyectos de pavimentación, las propiedades de la HMA no afectarán a la selección del ajuste de frecuencia, como tampoco lo hará el espesor de la capa a compactar, siempre que éste sea superior a 25 mm (1 pulg.). La mayoría de los rodillos vibratorios están diseñados de forma que la frecuencia más alta pueda utilizarse con el ajuste de amplitud más alto, aunque en algunos rodillos es necesario operar con una frecuencia algo más baja cuando el rodillo se utiliza con el ajuste de amplitud más alto. La combinación óptima de amplitud vibratoria, frecuencia vibratoria y velocidad del rodillo proporcionará la mayor ganancia de densidad en cada pasada del rodillo y también la mayor suavidad para la superficie del pavimento.

Cuando se utiliza un rodillo vibratorio, el operador controla más variables que cuando utiliza los otros tipos de rodillos y, por tanto, debe estar bien capacitado en la selección e interacción adecuadas de esas variables. La amplitud nominal y la frecuencia pueden variarse además de la velocidad del rodillo, la ubicación del rodillo con respecto a la pavimentadora y el número de pasadas realizadas sobre cada punto de la superficie del pavimento.

En los rodillos vibratorios de doble tambor, el operador puede hacer vibrar uno o ambos tambores. De este modo, el operador puede controlar el esfuerzo de compactación aplicado a la mezcla en mayor medida que con los rodillos estáticos de ruedas de acero o neumáticos. En la mayoría de los casos, es más eficaz hacer funcionar ambos tambores de un rodillo vibrante de doble tambor en el modo vibratorio. La única excepción es cuando el rodillo está subiendo o bajando una cuesta empinada, en cuyo caso puede ser necesario hacer funcionar sólo un tambor en modo vibratorio para que el rodillo pueda mantener el movimiento de avance en la cuesta sin deslizarse fuera de la capa.

Algunos operadores de rodillos funcionan en el modo vibratorio mientras se mueven sólo en una dirección detrás de la pavimentadora - normalmente hacia la pavimentadora. Cuando el rodillo se aleja de la pavimentadora, el operador desconecta la vibración y funciona en modo estático. Para la gran mayoría de las mezclas de MAC, no hay razón para hacer funcionar el rodillo en el modo estático y reducir el esfuerzo de compactación de este tipo de rodillo.

Para determinar la combinación óptima de velocidad del rodillo y amplitud vibratoria para un determinado

conjunto de condiciones de proyecto, puede ser necesario construir una banda de prueba de rodillo. Si no se puede alcanzar la densidad requerida, normalmente se debe reducir la velocidad del rodillo y cambiar el ajuste de amplitud nominal, a menos que el rodillo ya esté en el ajuste de amplitud más bajo.

Se debe tener cuidado cuando se opera un rodillo vibratorio en el modo vibratorio si hay servicios públicos subterráneos o estructuras de drenaje directamente debajo de la capa de pavimento que se está compactando. Si existe la posibilidad de que dichos servicios o estructuras puedan resultar dañados por las vibraciones del rodillo, el equipo deberá funcionar en modo estático.

Rodillos combinados

Los rodillos combinados combinan un tambor de rodillo vibratorio en la parte delantera del rodillo y un juego de cuatro neumáticos de goma en la parte trasera. Se ha sugerido que estos rodillos son lo mejor de ambos mundos, ya que combinan dos tipos claramente diferentes de esfuerzo de compactación - la fuerza vibratoria y la acción amasadora de los neumáticos. En realidad, sin embargo, este tipo de rodillo puede producir una variación significativa de la densidad en toda la anchura del carril que se está compactando.

La anchura exterior de los neumáticos de goma suele ser igual a la anchura del tambor vibratorio. Sin embargo, el problema radica en los huecos que quedan entre las cuatro ruedas de goma de la parte trasera del rodillo. A diferencia de un rodillo neumático estándar, en el que los neumáticos de la parte trasera del rodillo encajan en los espacios dejados por los huecos entre los neumáticos delanteros, el rodillo combinado no tiene neumáticos adicionales para rellenar los huecos. Sería poco realista esperar que el operador del rodillo pudiera solapar cada pasada sucesiva del rodillo exactamente una anchura de neumático para obtener una densidad uniforme en toda la anchura del carril. Por lo tanto, este tipo de rodillo debe utilizarse con precaución al compactar HMA.

VARIABLES DE COMPACTACIÓN BAJO EL CONTROL DEL OPERARIO

Para todos los tipos de rodillos, las principales variables de compactación que pueden controlarse durante el proceso de laminado son la velocidad del rodillo, el número de pasadas del rodillo, la zona de laminado y el patrón de laminado. En el caso de los rodillos vibratorios, la dirección de desplazamiento y el modo de funcionamiento también están bajo el control del operador. Cada uno de estos factores influye en el nivel de densidad alcanzado con el esfuerzo de compactación aplicado a la mezcla.

Velocidad del rodillo

Cuanto más rápido pase un rodillo por un punto concreto de la nueva superficie de asfalto, menos tiempo «permanecerá» el peso del rodillo en ese punto. Esto a su vez significa que se aplica menos esfuerzo de compactación a la mezcla. A medida que aumenta la velocidad del rodillo, disminuye la cantidad de densidad ganada con cada pasada. La velocidad del rodillo seleccionada depende de una combinación de factores: velocidad de la pavimentadora, espesor de la capa y posición del equipo en el tren de rodillos.

Los rodillos estáticos de ruedas de acero pueden funcionar a velocidades de 3 a 9 km/h (2 toa mph); los rodillos de neumáticos suelen funcionar a velocidades de 3 a 11 km/h (2 to 7 mph); y los rodillos vibratorios pueden funcionar a velocidades de 3 a 6 km/h (2 a 3 $^{1}/_{2}$mph). En la posición de avería, cada tipo de rodillo debe funcionar al extremo inferior de su gama de velocidades. En la posición de compactación inicial, cada tipo de rodillo debe funcionar al extremo inferior de su gama de velocidades. En la posición intermedia, la velocidad del rodillo puede aumentarse un poco, normalmente hasta la mitad de la gama de velocidades. En la posición de laminado de acabado, el rodillo puede estar cerca del extremo superior de su rango de velocidad. La Tabla 18-1 muestra el de velocidades de los rodillos para tres tipos diferentes de rodillos y tres posiciones de funcionamiento distintas. Los rodillos pueden moverse más rápido o más despacio que estas velocidades, pero el esfuerzo de compactación mejora significativamente a velocidades de rodillo más lentas.

La velocidad de los rodillos también se rige por el desplazamiento lateral o la ternura de la mezcla asfáltica. Si la mezcla se desplaza excesivamente bajo los rodillos, deberá reducirse la velocidad del equipo de compactación. Además, la velocidad del rodillo afecta al espaciado de impacto de los rodillos vibratorios. Como se ha comentado anteriormente, este espaciado es importante para controlar la cantidad de energía de compactación dinámica aplicada a la mezcla, así como para obtener la suavidad superficial adecuada.

La velocidad del rodillo suele establecerse en función de la velocidad de la pavimentadora. Con demasiada frecuencia, si la pavimentadora se aleja de los rodillos, éstos aumentan la velocidad para alcanzarla, lo que provoca que la densidad de la mezcla asfáltica sea menor tras aplicar el mismo número de pasadas derodillo. La velocidad de la pavimentadora debe seleccionarse para que coincida con la tasa de producción de la planta de asfalto, y esa velocidad debe mantenerse constante. A continuación, debe determinarse la velocidad de cada rodillo en función de la velocidad de la pavimentadora y del número de pasadas que debe aplicar cada rodillo.

Type of Roller	Operating Position		
	Breakdown	Intermediate	Finish
Static steel wheel	2–3½	2½–4	3–5
Pneumatic	2–3½	2½–4	4–7
Vibratory	2–3	2½–3½	—

Note: 1 mph = 1.6 km/h.

TABLA 18-1 Rango de velocidades de los rodillos (mph).

Cambiar la velocidad del rodillo sólo provoca variaciones en la densidad. “Lento y constante” es la clave para una compactación adecuada.

Si la pavimentadora se adelanta continuamente a los rodillos, se pueden tomar varias medidas. En primer lugar, se puede reducir la velocidad de la pavimentadora para adaptarla a la producción de la planta y de los rodillos. Con demasiada frecuencia, la pavimentadora funciona “deprisa y esperando” entre cargas de camión. Si la capacidad de producción de la planta requiere velocidades de pavimentadora más altas, se necesitan rodillos adicionales para conseguir una densidad adecuada. También pueden emplearse rodillos más anchos. Por ejemplo, puede utilizarse un rodillo vibratorio de 2,1 m (7 pies) de ancho en lugar de un rodillo tándem de 1,4 m (4 $^{1}/_{2}$pies) de ancho. También se puede cambiar el tipo de rodillo utilizado; por ejemplo, se puede utilizar un rodillo vibratorio de doble tambor en lugar de un rodillo vibratorio de un solo tambor o un rodillo estático de ruedas de acero.

El rodillo de compactación incial y, a veces, el rodillo intermedio puede detenerse cada vez que la pavimentadora se para a esperar a los camiones, aunque los rodillos no hayan completado sus patrones de rodillo. Cuando llega el siguiente camión y la pavimentadora vuelve a ponerse en marcha, los rodillos también se reinician y terminan de compactar la mezcla. Sin embargo, mientras los rodillos han estado inactivos, la mezcla de la calzada se ha enfriado, y la densidad obtenida en la zona enfriada será normalmente inferior a la de la zona circundante. El rodillo debe seguir rodando hasta completar el patrón establecido y el número de pasadas sobre cada punto.

Número de pasadas del rodillo

Para obtener el contenido de aire vacío y la densidad uniforme deseados en una mezcla asfáltica, cada punto del pavimento debe rodarse un determinado número de veces. El número de pasadas necesarias depende de muchas variables, incluyendo, la más importante, el tipo de equipo de compactación. Los rodillos de tres ruedas, los rodillos tandem de ruedas de acero, los rodillos de llantas neumáticas y los rodillos vibratorios de un o doble tambor tienen capacidades diferentes. Al mismo tiempo, las capacidades de cada tipo de rodillo dependen del espesor de la capa, la temperatura de la mezcla, las propiedades de diseño de la mezcla (contenido de ligante, rigidez del ligante y características de los áridos) y las condiciones ambientales. Por último, el número de pasadas necesarias depende de la posición del rodillo en el tren de rodillos.

Al inicio de cualquier proyecto importante de pavimentación, deberán construirse una o más franjas de prueba para determinar el número mínimo de pasadas de rodillo necesarias para alcanzar los niveles de densidad adecuados. Deberán probarse diferentes combinaciones de rodillos y patrones de rodillos para determinar la combinación óptima de variables de compactación que permitan alcanzar el nivel de densidad requerido con la mayor eficacia posible.

Rara vez la primera combinación de rodillos, pasadas de rodillo y zonas de rodadura proporcionarán la secuencia de compactación más económica, a menos que la mezcla sea una que el contratista haya utilizado muchas veces en el pasado.

Las pasadas del rodillo deben distribuirse uniformemente a lo largo y ancho de la capa. Con demasiada frecuencia, el centro del carril de la pavimentadora (el área entre las huellas de las ruedas de un pavimento de un solo carril) recibe una cobertura adecuada del rodillo, mientras que los bordes de la capa reciben un esfuerzo considerablemente menor. Como se explica más adelante en la sección sobre patrones de rodadura, la uniformidad de las pasadas del rodillo a lo ancho del carril es tan importante como el número de pasadas.

Zona de rodadura

La compactación debe lograrse mientras la viscosidad del ligante asfáltico de la mezcla y la rigidez de ésta sean lo suficientemente bajas como para permitir la reorientación de las partículas de áridos bajo la acción de los rodillos. En otras palabras, la capa debe estar lo suficientemente caliente como para que la compactación sea eficaz. Como se ha comentado anteriormente, la regla empírica comúnmente utilizada es que el nivel adecuado de huecos de aire debe obtenerse antes de que la mezcla se enfríe desde su temperatura de colocación hasta 80ºC (175ºF). Para obtener el nivel de densidad requerido lo más rápidamente posible, la compactación inicial debe realizarse directamente detrás de la extendedora. Si la mezcla asfáltica es lo suficientemente estable, la rodadura de desglose puede llevarse a cabo muy cerca de la pavimentadora, mientras la temperatura de la mezcla es todavía alta. Se obtiene más densidad con una pasada cuando la temperatura de la mezcla es de 120°C (250°F) que cuando es de 110°C (230°F). Por lo tanto, la parte delantera de la zona de rodadura debe estar lo más cerca posible de la parte trasera de la pavimentadora. A veces, cuando se coloca una mezcla

tierna, se retrasa la compactación inicial para evitar que los rodillos empujen o controlen excesivamente la mezcla. Dependiendo de las características de la mezcla, puede alcanzarse la densidad requerida siempre que se aplique la combinación adecuada de rodillos y esfuerzo de compactación. En algunos casos, sin embargo, la mezcla es tan blanda que la compactación debe retrasarse hasta el punto de que no puede alcanzarse el nivel de densidad deseado. En este caso, deben probarse otras soluciones. Cuando la mezcla es blanda, es preciso determinar la causa de la blandura e introducir cambios en la producción del aglomerado y en las operaciones de extendido para garantizar una densidad adecuada. La compactación de las mezclas blandas se trata más adelante en esta sección.

Patrón de rodadura

Los rodillos deben funcionar la mayor parte del tiempo. La cuestión es si funcionan correcta y eficazmente. Con frecuencia, la compactación no se aplica en el lugar adecuado. Numerosos estudios de compactación han demostrado que el centro de la anchura de la pasada de la pavimentadora suele recibir un esfuerzo de compactación mucho mayor que los bordes. Lamentablemente, el tráfico utiliza las zonas de paso de las ruedas cercanas al borde del pavimento con más frecuencia que el centro de un carril.

Por ejemplo, en un proyecto real de pavimentación con MAC en una carretera interestatal, la mezcla se colocó en una sección de zanja de 3,7 m (12 pies) de ancho en dos capas compactadas de 75 mm (3 pulgadas) de espesor. La rodadura inicial o de compactación inicial de la primera capa se realizó con un rodillo vibratorio de 2,1 m (7 pies) de ancho. Para el paso de la pavimentadora de 3,7 m (12 pies) de ancho, dos pasadas del rodillo vibratorio podían cubrir todo el ancho de la capa, con un solapamiento de 0,5 m (2 pies) en el centro. Para obtener una densidad adecuada, el operador del rodillo de desglose tenía que mantener el rodillo vibratorio pegado a cada lado de la zanja. Para cubrir toda la anchura del carril, el operador sólo tendría que hacer una pasada de rodillo a cada lado del carril, directamente hacia la pavimentadora y luego alejándose de ella, sin intentar nunca pasar el rodillo por el centro del carril.

En su lugar, el operador del rodillo realizó su primera pasada, de 3,7 m (7 pies) de ancho, por el lado izquierdo de la capa. Al llegar a la parte trasera de la pavimentadora, el operador invirtió la dirección, cambió ligeramente la dirección lateral y se alejó de la pavimentadora desplazándose por el centro de la alfombra, con 0,8 m (2 $^1/_2$ft, ósea dos un medio) de área libre a cada lado del rodillo. La tercera pasada, de nuevo hacia la pavimentadora, se realizó por el borde derecho del carril de circulación. La cuarta pasada (alejándose de la pavimentadora) fue de nuevo por el centro, similar a la segunda. La última pasada, para alcanzar a la pavimentadora, fue a la inversa de la cuarta - por el centro del carril. El operador del rodillo siguió repitiendo este patrón de cinco pasadas a medida que la pavimentadora avanzaba por la carretera

Se aplicaron cinco pasadas de este rodillo de desglose en el centro de la zona de 3,7 m (12 pies) de ancho, una zona no utilizada por el tráfico. Sólo se aplicó una pasada sobre cada paso de rueda y cada borde exterior del ascensor. Sencillamente, el rodillo no se utilizaba correctamente. En esta estructura de pavimento se produjo un fallo futuro porque no se obtuvo la densidad adecuada en los caminos de ruedas donde era necesario. Si el número de pasadas de rodillo realizadas en cada borde del carril que se está compactando es adecuado para cumplir las especificaciones, el nivel de densidad en el centro del carril siempre será más que suficiente para cumplir también las especificaciones. Por lo tanto, los patrones de los rodillos deben diseñarse para garantizar una compactación adecuada y uniforme de toda lo ancho del carril.

Para cada rodillo utilizado en un proyecto, el ancho de la capa puede dividirse por la anchura de los tambores de compactación para determinar el número de pasadas necesarias para cubrir cada punto transversal de la superficie. Una pasada se define como un viaje del rodillo en una dirección sobre cualquier punto. Se necesitan varias pasadas para compactar completamente cada punto de la superficie del pavimento sobre la anchura transversal del carril que se está pavimentando hasta alcanzar el nivel de densidad requerido.

Si el ancho de los tambores (o neumáticos) del rodillo es de 2,1 m (7 pies), sólo se necesitan dos pasadas para cubrir un carril de 3,7 m (12 pies) de ancho, incluyendo un voladizo de 150 mm (6 pulg.) de anchura sobre cada borde del pavimento. Dos pasadas del rodillo de 2,1 m (7 pies) de ancho se solapan durante una distancia de unos 300 mm (12 pulgadas) en el centro del carril. Si se tiene en cuenta el hecho de que el operador del rodillo no siempre puede mantener un voladizo de 150 mm (6 pulg.) en el borde del pavimento, el solapamiento de 300 mm (12 pulg.) de ancho en el centro del carril sigue siendo suficiente para permitir que todo el ancho del pavimento se compacte en dos pasadas con un solapamiento mínimo de 150 mm (6 pulg.) de ancho necesario entre las pasadas del rodillo.

Un rodillo de 1,8 m (6 pies) de ancho no puede cubrir un carril completo de 3,7 m (12 pies) de ancho en sólo dos pasadas. Dos pasadas no permiten ningún saliente en el borde del carril ni ningún solapamiento en el centro. Por lo tanto, son necesarias tres pasadas de un rodillo de 1,8 m de ancho para compactar el carril correctamente.

Si el rodillo tiene tambores o neumáticos de sólo 1,5 m (5 pies) de ancho, se requieren tres pasadas del rodillo, como en el caso de un rodillo con tambores de

1,8 m (6 pies) de ancho. Si se permiten 150 mm (6 pulg.) para el voladizo del borde del carril, la cantidad de solapamiento entre las pasadas del rodillo debe ser de unos 300 mm (12 pulg.). Este solapamiento permite una amplia variación de dirección por parte del operador del rodillo y permite cubrir una anchura de carril de 3,7 m (12 pies) con tres pasadas del rodillo de 1,5 m (5 pies) de anchura.

Un rodillo con tambores de 1,4 m (4,5 pies) de ancho necesita hacer cuatro pasadas a lo ancho de un carril de 3,7 m (12 pies) para cubrir completamente el ancho del carril. Si este rodillo sobresale 150 mm (6 pulg.) por cada borde del pavimento y sólo se realizan tres pasadas a lo ancho del carril, los tambores del rodillo se solaparán sólo 75 mm (3 pulg.) entre la primera y la segunda pasada y 75 mm (3 pulg.) entre la segunda y la tercera pasada a lo ancho. Esta cantidad de solapamiento entre pasadas no es adecuada para garantizar una compactación uniforme. Por lo tanto, son necesarias cuatro pasadas del rodillo de 1,4 m (4,5 pies) de anchura para compactar adecuadamente un carril de pavimentación de 3,7 m (12 pies) de anchura.

En dirección longitudinal, los rodillos no deben detenerse en el mismo punto final transversal con cada pasada del rodillo; los puntos de inversión deben escalonarse para evitar el empuje de la mezcla. Un ligero cambio de dirección, o curvatura, puede ser beneficioso en cada punto de inversión para reducir aún más la tendencia de la mezcla a empujar bajo el compactador y eliminar la posibilidad de un bache en el punto donde se produce la inversión del rodillo.

El rodillo no debe esperar estacionado sobre la capa/estera caliente. Un retraso prolongado causado por la falta de camiones de transporte en la pavimentadora o el llenado de agua de la compactadora permite que el rodillo haga mellas en la nueva capa/estera. Generalmente es imposible eliminar estas marcas una vez que la capa se ha enfriado. Por lo tanto, cuando no se utilicen, todos los rodillos deben estacionarse en el arcén o en ángulo sobre la capa/estera más fría.

Muchas especificaciones de compactación antiguas exigen que el proceso de compactación comience en la parte baja del carril del pavimento y continúe hacia la parte alta o superior en las pasadas subsiguientes del rodillo. Con equipos de compactación modernos y mezclas asfálticas más estables, este requisito suele ser innecesario, pero puede ser aconsejable para peraltes y levantamientos que sean gruesos en relación con el tamaño máximo de las partículas. Además, algunas especificaciones antiguas establecían que los rodillos debían solapar la anchura de la pasada anterior en al menos la mitad de la anchura del rodillo. Este procedimiento da lugar a una compactación no uniforme en toda la anchura del carril del pavimento y a una clara falta de densidad en los bordes exteriores del carril. La práctica estándar moderna consiste en que cada rodillo solape su propia pasada un mínimo de 150 mm (6 pulg.).

La determinación del patrón de rodadura se analiza en detalle en la siguiente sección.

Dirección de recorrido y modo de Funcionamiento de los rodillos vibratorios

Cuando se utiliza un rodillo vibratorio de un solo tambor, el tambor de compresión debe accionarse normalmente hacia la pavimentadora. Esta práctica garantiza que el máximo esfuerzo de compactación del tambor de compresión se deposite sobre la capa antes que el menor esfuerzo de compactación del tambor de dirección. Además, esta práctica da como resultado una capa más densa para resistir mejor el desplazamiento de la mezcla causado por el movimiento continuo del tambor timón durante la acción de dirección. Un rodillo de bastidor articulado de un solo tambor también debe funcionar con el tambor motriz hacia la máquina de extendido, de nuevo para garantizar que se aplica el máximo esfuerzo de compactación a la mezcla lo más rapido posible.

Cuando sólo un tambor de un rodillo de doble tambor funciona en modo vibratorio, el rodillo suele funcionar con el tambor vibratorio hacia la máquina de extendido y el tambor estático hacia atrás. Un rodillo de doble tambor y bastidor articulado que tiene dos tambores accionados (un rodillo vibratorio tándem) funciona igual en cualquier dirección. Por lo tanto, para este tipo de rodillo, la dirección de desplazamiento no es un factor a tener en cuenta.

Para mezclas duras o rígidas, la rodadura de desglose se realiza normalmente con ambos tambores de un rodillo de doble tambor vibrando. Las pasadas siguientes se realizan también en el modo de vibración total. Para mezclas con estabilidad normal, la rodadura de desglose con un rodillo vibratorio también debe realizarse generalmente en el modo de vibración total. Para mezclas blandas, como se explica más adelante, la rodadura de desglose inicial se realiza a veces en modo estático o en un modo combinado. Las pasadas siguientes suelen realizarse en el modo combinado si el desplazamiento de la mezcla no es demasiado grande. Cuando se trabaja en el modo combinado para mezclas tiernas, normalmente se hace vibrar el tambor de arrastre en lugar del tambor delantero

DETERMINACIÓN DEL PATRÓN DE RODADO

Las diferentes mezclas pueden requerir niveles considerablemente diferentes de esfuerzo de compactación y, por tanto, diferentes equipos de compactación y procedimientos de rodado. Por ejemplo, pueden ser necesarios diferentes tipos o combinaciones de rodillos para alcanzar el nivel de densidad requerido para una mezcla asfáltica que contenga áridos de gran

tamaño que para una mezcla hecha con áridos gruesos de menor tamaño.

Como se ha sugerido anteriormente, el patrón de rodadura que se utilizará en un proyecto de pavimentación concreto debería determinarse al inicio del proyecto mediante la construcción de una o más franjas de prueba de rodadura. La(s) tira(s) debe(n) estar situada(s) en un punto conveniente donde la capa de pavimento colocada permanecerá como parte de la estructura final del pavimento. La mezcla debe ser representativa del material que se producirá para el proyecto; generalmente, la planta debe producir mezcla durante un corto período de tiempo antes de que se haga la mezcla para la sección de prueba de compactación, de modo que la mezcla sea lo más consistente posible. El espesor de la capa compactada debe ser el mismo que el que se utilizará para el resto de esa capa, y la longitud de la(s) franja(s) de prueba debe ser de al menos 100 m (330 pies). El estado de las capas subyacentes deberá ser representativo del del resto del proyecto.

Debe prestarse la debida atención a la selección de los rodillos que se van a utilizar. La combinación de rodillos utilizada en un proyecto anterior puede no ser la más rentable o eficaz para las variables que intervienen en el presente trabajo. Aunque los rodillos vibratorios se utilizan generalmente para la rodadura de desprendimiento y los rodillos neumáticos para la rodadura intermedia, puede obtenerse un mayor grado de densidad con menos pasadas de rodillo para algunas mezclas rígidas cuando se utiliza un rodillo neumático grande en la posición de desprendimiento, con el rodillo vibratorio a continuación en la posición intermedia.

Si se utiliza una llanta de rodillos neumático grandes en la posición de compactación inicial, generalmente es difícil determinar el grado de densidad obtenido en la capa utilizando un medidor nuclear (que se discutirá a continuación) debido a la superficie irregular de la capa después de los primeros y varios pases de los neumáticos. Las lecturas nucleares deben tomarse después de que la mezcla haya sido alisada con el rodillo de ruedas de acero intermedio, ya sea vibratorio o estático. Se debe usar una tira de prueba de compactación para determinar la secuencia más eficaz de rodillos para lograr el grado requerido de compactación, suavidad de la capa y producción económica.

Los niveles de densidad deseados son más fáciles de obtener cuando la mezcla asfáltica está caliente. Como se ha comentado anteriormente, en lugar de utilizar los rodillos en la formación tradicional de tren de rodillos, se debe considerar la posibilidad de utilizar dos rodillos de compactación inicial, preferiblemente del mismo tipo, en lugar de un rodillo de compactación inicial seguido de un rodillo intermedio. Esta práctica es particularmente beneficiosa en capas finas de mezcla bajo condiciones ambientales desfavorables.

Como se ha indicado anteriormente, pueden utilizarse dos rodillos de compactación incial uno al lado del otro para agilizar la compactación. Dependiendo de la anchura de cada rodillo y la del carril, la compactación completa a lo largo de la anchura de la pavimentación puede realizarse normalmente con gran rapidez. Si se emplean dos rodillos diferentes uno al lado del otro en la posición de compactación incial - un rodillo vibratorio de doble tambor y un rodillo neumático, por ejemplo - es importante que cada rodillo cubra toda lo largo del carril en algún momento durante el proceso de compactación. Los dos rodillos tendrán que alternarse en su posición para conseguirlo, pero con un poco de práctica, la operación puede realizarse fácilmente. Una vez más, el propósito de utilizar dos rodillos, ambos funcionando en la posición de compactación inicial, es aplicar un esfuerzo de compactación a la capa antes de que se enfríe.

Cálculo del patrón de rodadura

Para determinar el patrón de rodadura óptimo, el primer cálculo necesario es la velocidad de la pavimentadora, que se basa en la cantidad de mezcla que debe producir la planta, lo ancho del carril del pavimento y la profundidad de la mezcla. Una vez conocida la velocidad media de la pavimentadora, debe seleccionarse la velocidad máxima de los rodillos. La velocidad seleccionada para cada rodillo dependerá del tipo de rodillo y el ancho, así como de su posición en la secuencia de rodadura. La velocidad seleccionada dependerá también de la capacidad del rodillo para lograr un equilibrio entre la densidad, la nivelación y la uniformidad de la superficie del pavimento.

El segundo cálculo consiste en comparar la anchura de la capa que se va a colocar y el ancho de los rodillos que se van a utilizar para determinar el número de pasadas transversales de rodillo necesarias para cubrir toda la anchura del pavimento. El número de pasadas debe corresponderse con la velocidad de la pavimentadora. (Una pasada se define como un recorrido del rodillo en una dirección sobre cualquier punto de la superficie del pavimento). Teniendo en cuenta la velocidad de la pavimentadora, la velocidad del rodillo y el número de carriles transversales necesarios para cubrir lo ancho de la carretera, es posible determinar el número de pasadas que cada rodillo puede realizar sobre cada punto de la pavimentación manteniendo el ritmo de la pavimentadora.

Como se ha comentado anteriormente, el número de pasadas de rodillo necesarias sobre cada punto de la superficie del pavimento depende de un gran número de variables. Una de las más importantes es el nivel de densidad requerido en la capa de pavimento. Si se utiliza una especificación de método, el número de pasadas necesarias puede contarse simplemente. Sin embargo, lo

que no se conoce es el grado de densidad (contenido en vacíos de aire) que se obtendrá en la mezcla una vez completado el número de pasadas especificado. Si se exige un determinado porcentaje de la densidad de laboratorio o de la densidad máxima teórica, cuanto mayor sea el porcentaje exigido, mayor será el esfuerzo de compactación que habrá que aplicar a la capa de pavimentado.

El tipo de rodillo de compactación inicial utilizado también será muy importante. En algunas condiciones, un rodillo vibratorio puede ser suficiente para alcanzar la densidad requerida, dependiendo de las propiedades de la mezcla. En otros casos, por ejemplo, si la mezcla es blanda y se producen grietas, pueden ser necesarias varias pasadas de un rodillo neumático para alcanzar el nivel de densidad requerido. Normalmente se necesitan una o más pasadas de un rodillo estático de rueda de acero para eliminar las marcas del rodillo, especialmente si se ha utilizado un compactador de neumáticos. Debido a la cantidad de variables que intervienen, es imposible generalizar sobre la mejor combinación de rodillo y modelo de rodillo que se puede utilizar en todos los casos.

Algunos contratistas utilizan siempre los mismos rodillos en el mismo orden y realizando el mismo número de pasadas sobre la mezcla, independientemente de las variables del proyecto. Se aplica el mismo esfuerzo de compactación global a una capa fina que a una gruesa, a una mezcla colocada durante los calurosos meses de verano que, a una colocada durante la fresca estación de primavera u otoño, a una mezcla colocada sobre una cimentación muy fuerte que a una colocada sobre una base débil, y a una mezcla que es muy rígida que a una que es blanda. Sin embargo, como se ha señalado, las diferentes mezclas y las diferentes condiciones del proyecto requieren diferentes esfuerzos de compactación para obtener el mismo grado de densidad.

Control de la densidad

El método más común para supervisar los cambios de densidad con las pasadas de rodillo es con un densímetro nuclear, que se muestra en las figuras 18-7 y 18-8. La densidad se estima transmitiendo rayos gamma a la mezcla y midiendo la cantidad de radiación reflejada de vuelta al dispositivo en un tiempo determinado. Los datos obtenidos pueden relacionarse con la densidad relativa de la capa. Las lecturas del medidor nuclear deben realizarse después de cada pasada de cada rodillo, y debe determinarse la tasa de aumento de la densidad después de cada pasada. Cuando no se obtiene un aumento apreciable de la densidad con la aplicación de pasadas adicionales del rodillo, normalmente se ha obtenido la densidad relativa máxima para esa mezcla. Como se ha indicado anteriormente, cuando se utiliza un rodillo neumático en el proceso de compactación, especialmente en el modo de inicio de compactación, a menudo es muy difícil obtener una lectura precisa de la densidad con un medidor nuclear. Pueden ser necesarias una o más pasadas con un rodillo de ruedas de acero antes de que pueda obtenerse una lectura válida del medidor nuclear.

El valor de densidad determinado con un medidor nuclear es relativo y, por lo general, no coincide con el valor de densidad obtenido a partir de testigos cortados del pavimento. Debe establecerse una correlación entre la lectura de la densidad nuclear y el peso unitario real del pavimento utilizando testigos cortados de la sección de ensayo una vez finalizado el proceso de rodadura. El peso unitario real debe compararse con el peso unitario teórico máximo de la mezcla o con la química de laboratorio para determinar si se ha alcanzado la densidad requerida.

Debido a que diferentes medidores nucleares proporcionan diferentes lecturas, se debe utilizar un único medidor en todo el proyecto. Si se utiliza más de un medidor, cada uno deberá correlacionarse adecuadamente con la densidad del núcleo para que las lecturas nucleares de cada uno controlen con precisión el nivel de densidad que se está obteniendo en la estera. Deberá establecerse una nueva relación de correlación cada vez que se produzca un cambio significativo en eldiseño de la mezcla de MAC, en el espesor de la capa que se está compactando o en la rigidez de la estructura subyacente del pavimento.

FIGURA 18-7 Medidor nuclear para controlar la densidad.

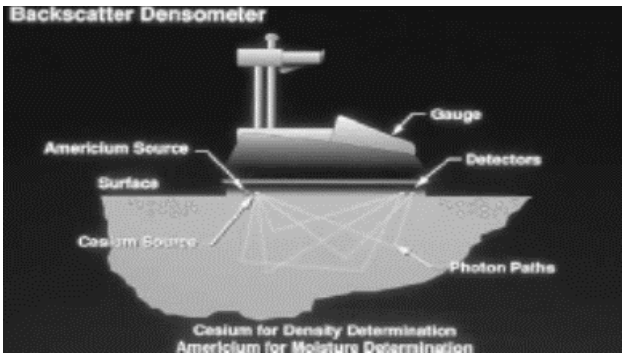


FIGURA 18-8 Esquema del medidor/calibrador nuclear

Usualmente se correlaciona un densímetro nuclear con el peso unitario extrayendo testigos de una de las franjas de prueba al inicio del proyecto. Se seleccionan varias ubicaciones -se suelen utilizar 10- por número aleatorio. Se toman múltiples lecturas de densidad encima de cada punto marcado. A continuación, se cortan los testigos y se analizan para determinar la densidad. Se elabora un gráfico en el que la lectura media de la densidad nuclear en cada punto se representa en un eje y la densidad del núcleo correspondiente se representa en el otro. Se traza una línea de correlación de mejor ajuste a través de los puntos de datos. Posteriormente, cuando se utiliza el medidor nuclear para controlar la densidad, la lectura del medidor se convierte en densidad del núcleo utilizando la línea de mejor ajuste.

Para obtener una correlación, algunos operadores calculan la lectura media de la densidad nuclear y la comparan con la densidad media del núcleo. En efecto, suponen que existe una diferencia constante entre los dos métodos. En realidad, la diferencia no es constante, sino que depende de la lectura del medidor nuclear. Por lo tanto, no debe utilizarse una diferencia constante.

Compactación de mezclas rígidas

Las mezclas de MAC correctamente diseñadas serán bastante rígidas y estables y requerirán un esfuerzo de compactación considerable para alcanzar el grado de densidad requerido. Este tipo de mezcla soportará el peso del equipo de compactación directamente detrás de la pavimentadora. Si la mezcla se coloca a una temperatura de 135°C (275°F) o superior, los rodillos normalmente podrán compactar la mezcla adecuadamente antes de que se enfríe a una temperatura de 80°C (175°F).

En la mayoría de los casos, se utilizan tres rodillos: un rodillo de compactación inicial, un rodillo intermedio y un rodillo de acabado. Para la rodadura de compactación inicial, como se ha comentado anteriormente, se suele utilizar un rodillo vibratorio con ruedas de acero. Para el laminado intermedio, se suele emplear un rodillo neumático, aunque a veces se utiliza un segundo rodillo vibratorio. El laminado de acabado se realiza normalmente con un rodillo de ruedas de acero estático.

Los rodillos de compactación inicial e intermedios deben permanecer cerca de la pavimentadora. Si la mezcla es estable, no se producirá una onda de arco delante del tambor del rodillo vibratorio, y la mezcla no mostrará grietas ni fisuras. Con una mezcla relativamente rígida, el rodillo de acabado también debe estar cerca de la pavimentadora, ya que las marcas de los rodillos de desglose e intermedios que habrá que eliminar serán mínimas.

Para mezclas muy rígidas o cuando se desea un alto grado de densidad, se debe utilizar un rodillo neumático para la rodadura de compactación inicial. Para la rodadura intermedia, se utilizará un rodillo vibratorio de acero directamente detrás del rodillo neumático, y la rodadura final se realizará con un rodillo estático de acero. Debido a la estabilidad interna y a la resistencia de la mezcla rígida, puede ser necesario un mayor esfuerzo de compactación para obtener un determinado nivel de densidad (porcentaje de la densidad máxima teórica), pero la mezcla no se moverá bajo el equipo de compactación durante el proceso de rodadura.

Compactación de mezclas blandas

Una mezcla blanda es generalmente una mezcla internamente inestable que no soportará adecuadamente el peso del equipo de compactación cuando esté caliente y se moverá bajo el esfuerzo de compactación aplicado. El movimiento de la mezcla puede adoptar varias formas. En primer lugar, puede producirse una onda de arco delante de la rueda de acero, tanto en un rodillo vibratorio como en un rodillo de rueda de acero estático, a medida que estos rodillos se mueven longitudinalmente hacia arriba y hacia abajo de la capa. En segundo lugar, la capa puede ensancharse cuando los rodillos se utilizan para compactar el borde no soportado del carril, por ejemplo, la mezcla colocada a 3,7 m (12 pies) de ancho puede ensancharse hasta el ancho de 3,9 m ($12^1/_2$pies) o más. En tercer lugar, pueden aparecer grietas transversales en la mezcla durante el proceso de compactación. En cuarto lugar, pueden producirse jorobas longitudinales y grietas en la mezcla inmediatamente fuera de los bordes de la rueda de acero de los rodillos.

El ablandamiento suele presentarse de dos formas. El ablandamiento clásico se produce cuando el rodillo de compactación inicial es incapaz de acercarse a la pavimentadora sin que la mezcla comience a moverse. La deformación a media temperatura se produce cuando la mezcla de tras de la pavimentadora soporta el rodillo, pero empieza a moverse cuando la mezcla empieza a enfriarse.

Cuando se encuentra el ablandamiento clásico, los operarios del rodillo no se acercan a la parte trasera de la pavimentadora. Se quedan a cierta distancia detrás de la pavimentadora esperando a que la mezcla se enfríe lo suficiente hasta que el rodillo se apoye. El enfoque principal para manejar el ablandamiento clásico es permitir que la mezcla se enfríe. El mejor método es rediseñar la mezcla. Si la mezcla se utiliza en una ruta de alto tráfico, la mezcla debe ser rediseñada porque el ablandamiento clásico es normalmente un signo de una mezcla no resistente.

Cuando se encuentra un ablandamiento medio, los rodillos pueden acercarse hasta la pavimentadora. Las características de la ternura de rango medio de temperatura se manifiestan normalmente en la rodadura de avería si la temperatura de la mezcla en ese punto es

superior a aproximadamente 115°C (240°F). Tanto si la rodadura inicial se realiza con un rodillo vibratorio o neumático, la mezcla suele ser estable a temperaturas más altas. Sin embargo, cuando la temperatura de la estera desciende por debajo de este nivel, la mezcla puede volverse muy inestable y blanda. Puede aparecer una onda de arco delante de los rodillos de ruedas de acero, pueden producirse grietas en la superficie de la capa y la mezcla puede encorvarse fuera de los bordes de los tambores de acero de los rodillos. Además, la mezcla puede empezar a arrastrarse transversalmente a lo largo de cualquier borde longitudinal no soportado de la capa.

La mezcla puede seguir presentando estas características de ablandamiento a medida que la temperatura de la estera disminuye hasta aproximadamente 90°C (193°F) o menos. Si se intenta laminar en este rango medio de temperaturas, la mezcla se descompactará en lugar de compactarse. No es hasta que la mezcla está bastante fría, generalmente a menos de 90°C (193°F), cuando se vuelve lo suficientemente rígida para soportar de nuevo el peso del equipo de compactación. El laminado de acabado puede realizarse a menudo a temperaturas de 70°C (158°F) o menos. Además, normalmente es difícil que el rodillo de acabado elimine completamente todas las marcas de rodillo dejadas en la mezcla por los rodillos de compactación inicial e intermedios.

No obstante, debe tenerse en cuenta que las temperaturas citadas anteriormente -115°C (240°F) hasta 90°C (193°F) - no representan valores exactos. La terneza inicial de la mezcla puede ser evidente a temperaturas tan altas como 120°C (248°F) o tan bajas como 110°C (230°F), dependiendo de las características de la mezcla. Además, la mezcla puede seguir mostrando características de terneza a temperaturas tan altas como 95°C (203°F) o tan bajas como 80°C (175°F).

Se pueden utilizar varias técnicas diferentes para compactar las mezclas tiernas a media temperatura hasta el nivel de densidad requerido. En primer lugar, las mezclas blandas no se vuelven blandas hasta que la temperatura de la mezcla desciende. Esto significa que se puede aplicar una cantidad significativa de esfuerzo de compactación a la mezcla antes de que se ablande y empiece a moverse. Si se utiliza un rodillo vibratorio como rodillo de compactación inicial, deberá mantenerse lo más cerca posible de la pavimentadora. El rodillo debe realizar tantas pasadas como sea posible sobre la capa, tan rápido como sea posible, antes de que la mezcla comience a moverse, comprobar o marcarse. Una vez que comience el movimiento, no deben realizarse pasadas adicionales del rodillo de compactación inicial. Para la mayoría de las mezclas blandas, se pueden hacer de tres a cinco pasadas del rodillo de compactación inicial sobre cada punto de la superficie de la estera antes de que comience el movimiento o la fisuración.

En segundo lugar, si la mezcla se está moviendo bajo los rodillos en el rango medio de temperatura, los rodillos de ruedas de acero, ya sean vibratorios o estáticos, deben mantenerse alejados de la mezcla hasta que se enfríe hasta el punto en que vuelva a ser lo suficientemente estable como para soportar el peso del equipo de compactación. Si se continúa rodando cuando la estera está en movimiento, normalmente se producirá aún más movimiento; la mezcla se volverá menos estable con la aplicación de un esfuerzo de compactación adicional. En el caso de algunas mezclas, puede producirse un fuerte desplazamiento de la mezcla en el borde exterior del tambor de un rodillo de ruedas de acero si se sigue rodando.

En el intervalo de temperatura medio en el que se producirá la descompactación de una mezcla blanda si se utiliza un rodillo de ruedas de acero, se puede utilizar un rodillo neumático. Es menos probable que las ruedas de goma de este rodillo desplacen o agrieten la mezcla, y no se formará una onda de arco. Por lo tanto, el rodillo neumático puede utilizarse para ganar densidad a temperaturas medias.

El rodillo estático de acabado con ruedas de acero debe mantenerse bastante alejado de la pavimentadora. Este rodillo debe desplazarse hacia la pavimentadora, compactando la mezcla y eliminando las marcas del rodillo, hasta que se alcance la temperatura a la que la mezcla empieza a moverse o a deformarse bajo el esfuerzo de compactación aplicado. Cuando comience la fisuración o la onda de arco, el rodillo de acabado debe retroceder y la compactación de acabado debe realizarse a temperaturas más bajas.

Si no se dispone de un rodillo neumático para utilizarlo una vez que la mezcla haya comenzado a moverse y a fisurarse, se pueden utilizar dos rodillos vibratorios de doble tambor juntos, en formación escalonada o uno al lado del otro, inmediatamente detrás de la pavimentadora. El uso de dos rodillos permitirá que se realicen más pasadas de los dos rodillos de compactación inicial sobre cada punto de la superficie de la capa antes de que la mezcla se enfríe a la temperatura a la que se produce el movimiento y la fisuración. Dado que cada uno de los dos rodillos tiene menos superficie que compactar, a menudo es posible realizar de cinco a siete pasadas sobre cada punto de la capa antes de que comience el proceso de descompactación. Para una mezcla blanda, esto suele ser suficiente para obtener el nivel de densidad requerido. El rodillo de acabado sólo se utiliza para eliminar las marcas del rodillo, teniendo mucho cuidado de pasar el rodillo a una temperatura lo suficientemente baja como para no alterar la mezcla ya compactada.

Zona Blanda

Muchos contratistas han observado una zona blanda al usar mezclas Superpave, referidas anteriormente como mezclas blandas de temperatura media. Los comentarios siguientes sobre la zona de licitación fueron tomados del informe especial 180 de la asociación nacional del pavimento del asfalto:

En algunas mezclas diseñadas con Superpave, una zona blanda ha sido identificada en rangos de temperatura de aproximadamente 93-115°C (200-240°F). La mezcla puede ser satisfactoriamente compactada por encima de este rango o por debajo de este rango, pero la mezcla es blanda dentro del rango de temperatura y no puede ser compactada adecuadamente. Esto no es cierto para todas las mezclas, pero se ha observado para algunas mezclas diseñadas por Superpave. La mezcla se puede rodar satisfactoriamente con rodillos de goma-neumáticos dentro de esta gama blanda, pero, según lo indicado antes, estos rodillos pueden tener un problema de recogida cuando se utilizan los modificadores. Póngase en contacto con los fabricantes de rodillos sobre los procedimientos para eliminar el levantamiento de asfalto en los rodillos de neumáticos de goma.

Cuando se produce una mezcla blanda dentro del rango de temperaturas medias, el método de compactación preferido es alcanzar la densidad antes de que se enfríe a la zona crítica. Esto puede requerir un rodillo de compactación inicial adicional u otros cambios en las técnicas de laminación, pero es preferible obtener la densidad antes de llegar a la zona tierna. En algunos casos, la temperatura de la mezcla puede aumentarse ligeramente para proporcionar más tiempo de compactación. Sin embargo, las temperaturas excesivas magnificarán el problema. Otra alternativa consiste en utilizar un rodillo vibratorio de compactación inicial con ruedas de acero por encima de la zona tierna, seguido de un rodillo con neumáticos de goma que pueda funcionar en la zona blanda. El rodillo de acabado debe utilizarse después de que la mezcla se haya enfriado por debajo de la zona blanda. Este segundo método puede no ser satisfactorio si el rodillo neumático de goma recoge excesivamente.

Otra posibilidad es romper con un rodillo de rueda de acero por encima de la zona blanda y luego completar el proceso de laminación después de que la MAC se haya enfriado por debajo de la zona blanda. Esto se ha utilizado en una serie de proyectos, pero pueden producirse problemas debido al enfriamiento diferencial de la mezcla y debido a la ruptura excesiva de los áridos cuando se rueda en el modo vibratorio después de que la mezcla se haya enfriado por debajo de 200 °F. Por lo tanto, la rodadura vibratoria no debe utilizarse por debajo de aproximadamente 200 °F.

Si el problema de la zona blanda da lugar a un pavimento con poca densidad en obra, o si la longitud del tren de extendido es excesivamente larga debido al tiempo necesario para que la mezcla se enfríe, deben realizarse ajustes en el diseño de la mezcla para eliminar, o al menos reducir, la zona blanda por temperatura. Es importante que el equipo de extendido se comunique con el personal de la planta.

RESUMEN

Al supervisar el proceso de compactación deben tenerse en cuenta los siguientes factores (los factores que deben tenerse en cuenta al supervisar la construcción de juntas, como se indica en la Sección 17, también son aplicables en este caso):

- Para compactar correctamente una capa de asfalto, los rodillos deben utilizarse eficazmente mientras la mezcla esté todavía por encima de la temperatura mínima de compactación.
- El tiempo disponible para la compactación está relacionado principalmente con el espesor de la capa que se está colocando. Un aumento del espesor de la capa puede incrementar sustancialmente el tiempo disponible para que el rodillo densifique la mezcla.
- Un aumento de la temperatura de depósito de la mezcla detrás de la pavimentadora también puede aumentar el tiempo disponible para la compactación. Sin embargo, la viabilidad de este enfoque depende de las propiedades de la mezcla asfáltica a esa temperatura elevada y del ablandamiento de la mezcla bajo el equipo de compactación.
- Una disminución de la velocidad de los rodillos aumentará el esfuerzo de compactación aplicado a la mezcla.
- Los rodillos de compactación inicial e intermedios deben funcionar lo más cerca posible de la pavimentadora para obtener la densidad antes de que la mezcla se enfríe a una temperatura mínima de 80°C (175°F).
- Si la mezcla no puede soportar el peso del equipo de compactación, se deberá rediseñar la mezcla o modificar los procedimientos de compactación.
- Deberá controlarse el patrón de rodadura para garantizar que el equipo de compactación aplica la misma cantidad de esfuerzo de compactación en todos los puntos transversales del carril que se está pavimentando.
- La velocidad del equipo de compactación dependerá del tipo de rodillo utilizado y de su posición en el proceso de compactación. Para los rodillos estáticos de ruedas de acero y neumáticos en posición de inicio de compactación, la velocidad máxima no debe superar los 4,0 km (2 $^1/_2$mph, ósea dos un medio). Para un rodillo vibratorio en la misma posición, la velocidad máxima no debe superar los 6 km. (3 $^1/_2$mph), en función de la frecuencia de las vibraciones.
- Un rodillo vibratorio debe funcionar a la máxima frecuencia vibratoria posible para aumentar el número de impactos por pie. Se necesitan al menos de 30 a 40 impactos por metro (10 a 12 impactos

por pie) para obtener una densidad y nivelado de capa adecuado.

- El ajuste de amplitud nominal en el rodillo vibratorio debe determinarse de acuerdo con las características de la mezcla y el espesor de la capa que se está compactando. En general, los rodillos vibratorios deben funcionar en modo estático cuando el espesor de la capa compactada es inferior a unos 30 mm (1 $^{1}/_{4}$pulg,). Para espesores de capa mayores, el rodillo debe funcionar normalmente con una amplitud nominal baja. Si no se puede obtener densidad, se puede aumentar la amplitud nominal para determinar si un esfuerzo de compactación adicional será beneficioso para alcanzar el nivel de densidad requerido. En general, el ajuste de la amplitud nominal puede aumentarse en proporción al aumento del espesor compactado de la capa.
- La combinación óptima de rodillos y patrones de rodadura para un proyecto anterior puede no ser la misma que para un proyecto actual o incluso para un tipo o capa de mezcla diferente en el mismo proyecto. Deben construirse una o más secciones de prueba para determinar la combinación más eficiente y eficaz de equipos de compactación y patrones de rodadura a utilizar para cada combinación de variables de trabajo.
- Dos rodillos similares que funcionen uno al lado del otro (en escalón) producirán normalmente un mayor nivel de densidad en la mezcla con el mismo número de pasadas de rodillo que con los mismos dos rodillos operados de extremo a extremo como rodillos de compactación inicial e intermedios.
- Si los rodillos no pueden mantener la velocidad de la pavimentadora, deberán utilizarse más rodillos o deberá reducirse la velocidad de la pavimentadora.
- Se ha identificado una zona blanda a media temperatura para algunas mezclas Superpave. Estas mezclas muestran sensibilidad en el rango aproximado de temperatura de 95°C a 115°C (200°F a 240°F). Una atención cuidadosa a los procedimientos de laminación puede minimizar este problema.

19 Problemas de capas

Los problemas de capas pueden definirse como defectos que se producen en la mezcla asfáltica durante o poco después de que se hayan completado las operaciones de extendido y compactación. Estos problemas se dividen en dos categorías principales: (a) problemas relacionados con el equipo y (b) problemas relacionados con la mezcla. En esta sección, se revisan los principales problemas de la mezcla y se presenta una descripción de cada uno de ellos, incluyendo sus causas, soluciones y efectos sobre el comportamiento del pavimento a largo plazo.

La Tabla 19-1 resume los problemas examinados. La primera columna enumera los distintos problemas, mientras que las columnas restantes enumeran las posibles causas de cada uno. Las marcas indican las causas relacionadas con el equipo, mientras que las equis indican las causas relacionadas con la mezcla, que generalmente deberían corregirse mediante cambios en el diseño de la mezcla. A lo largo del análisis de las causas se incluyen referencias cruzadas a secciones anteriores en las que se pueden encontrar más detalles. Hay que tener en cuenta que, debido a la interacción de varias causas relacionadas con los equipos y con la mezcla, no se ha hecho ningún intento de clasificar las distintas causas.

ONDAS SUPERFICIALES

Descripción

Una superficie de asfalto puede tener dos tipos de ondas: cortas y largas. Las ondas cortas, también llamadas a veces ondulaciones o sombras de barrena, suelen tener una separación de 0,3 a 0,9 m (1 a 3 pies), siendo la separación más común de 0,45 a 0,60 m (1 $^1/_2$ a 2 pies). Las ondas largas están considerablemente más separadas. La distancia entre ellas puede corresponder a la distancia entre camiones cargados de mezcla. Las ondas largas también pueden estar asociadas con los puntos de inversión del equipo de compactación, particularmente en construcciones de elevación gruesa o cuando la MAC que se está colocando es tierno y se mueve longitudinalmente bajo el equipo de compactación.

Un tipo adicional de defecto en la superficie del pavimento es la rugosidad o efecto de tabla de lavar causado por el funcionamiento incorrecto de un rodillo vibratorio. La distancia entre estas ondas suele ser muy pequeña, normalmente inferior a 75 ó 100 mm (3 ó 4 pulgadas).

Causas

Una de las principales causas de las ondas cortas u ondulaciones es la fluctuación del material delante de la regla pavimentadora. La variación en la cantidad de mezcla transportada de vuelta a los sinfines por los transportadores

de listones y depositada delante de la regla hace que ésta suba y baje a medida que cambia la fuerza que la empuja. Demasiado aglomerado (en la parte superior de los sinfines) y demasiado poco (en la parte inferior de los sinfines) transportado en la cámara de los sinfines delante de la regla causa la superficie ondulada, ya que la regla reacciona a esta variación de la fuerza. La cabeza fluctuante de material hace que la regla gire alrededor de su punto de giro y "busque" un ángulo de ataque. A medida que cambia el ángulo de ataque de la regla, también cambia el espesor de la capa que se está colocando, y la suavidad de la nueva capa se ve directamente afectada (véase el apartado 15).

Otra causa de las ondas cortas es una regla en mal estado mecánico - una con un juego excesivo en las conexiones de control de la regla. Las ondas cortas también pueden formarse en la regla por un montaje o sensibilidad inadecuados del control automático de rasante en la pavimentadora o por el uso de un dispositivo de referencia de rasante inadecuado. O el problema puede estar relacionado con una referencia móvil (viga flotante) que esté rebotando, o con el hecho de que el conductor del camión mantenga pisados los frenos mientras el camión es empujado por la pavimentadora. (Ver Sección 16.)

Las ondas cortas también pueden estar relacionadas con el diseño de la mezcla, en particular con una mezcla cuya rigidez varía como resultado de cambios en la temperatura o composición de la mezcla. (Véase el apartado 3.) Al variar la rigidez de la mezcla, varían también las fuerzas de presión de la mezcla sobre la regla, provocando que ésta suba y baje y dando lugar a una capa con ondas cortas. Por último, si el diseño de la mezcla es inadecuado en cuanto a la gradación de los áridos, el contenido de asfalto, la temperatura de la mezcla o el contenido de humedad (la mezcla está blanda), los rodillos pueden presionar y desplazar la mezcla durante el proceso de compactación.

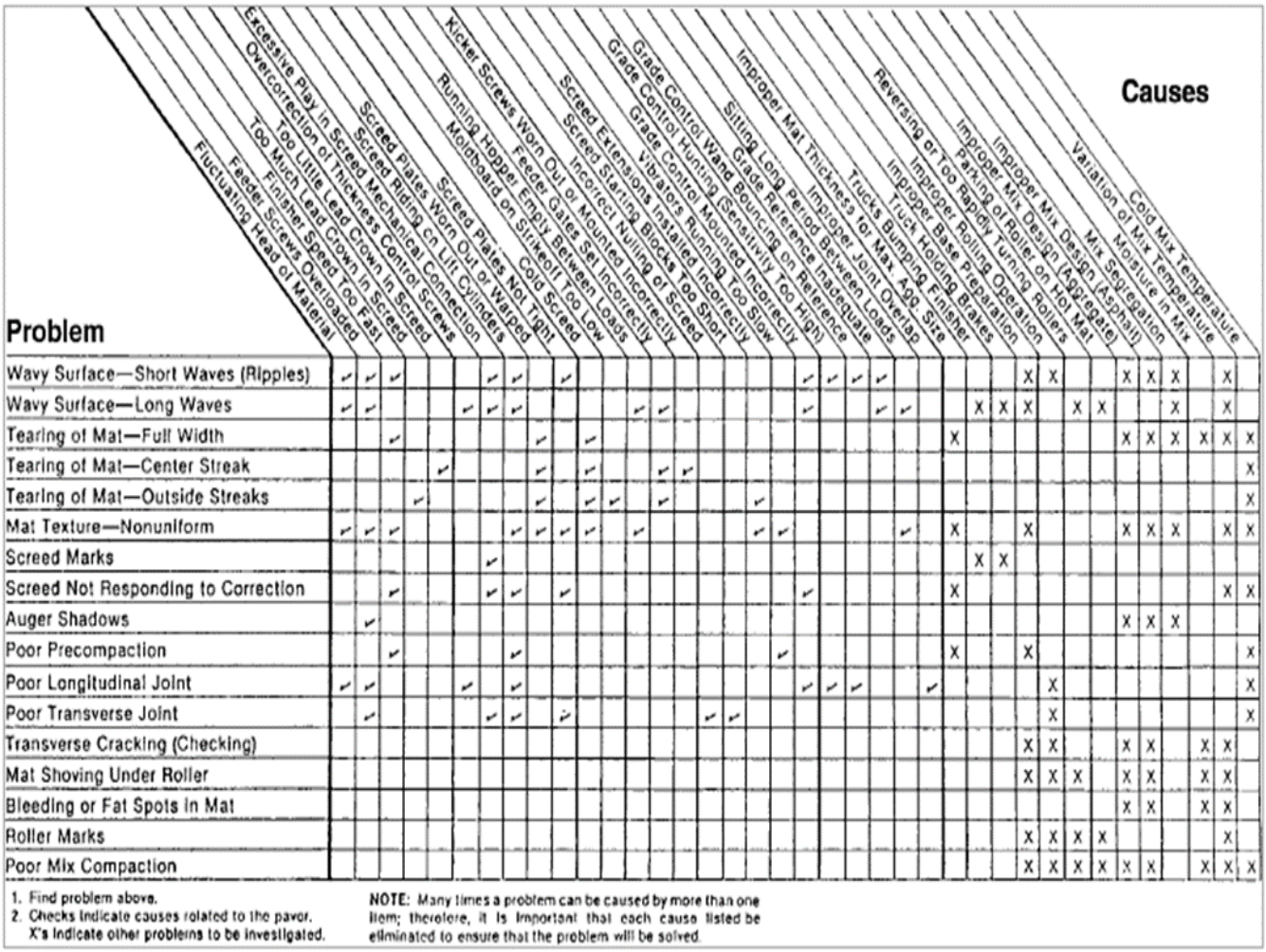


TABLA 19-1 Problemas de esteras y sus causas

Normalmente, sin embargo, las ondas cortas son colocadas en la capa por la pavimentadora debido a su funcionamiento o a cambios en la rigidez de la mezcla, más que por el funcionamiento del equipo de compactación.

Las ondas largas están causadas por algunas de las mismas variables que dan lugar a las ondas cortas. La fluctuación de la cantidad de material delante de la regla y la variación de la rigidez de la mezcla hacen que la regla reaccione al cambio de la fuerza ejercida sobre ella.

Sin embargo, si la distancia entre los picos de las ondas corresponde a la longitud de pavimento entre cargas de mezcla, las ondas pueden haber sido causadas por compuertas de flujo de la tolva mal ajustadas en la pavimentadora o por el vaciado de la tolva de la pavimentadora y los transportadores de tablillas entre cargas de mezcla. (Véase la sección 13.)

Un mal estado mecánico y un funcionamiento incorrecto de la regla (por ejemplo, cambiar continuamente las manivelas de control manual del espesor; véase el apartado 15), así como un montaje incorrecto de los controles automáticos de nivelación (véase el apartado 16), pueden provocar un problema de ondas largas. Si se utiliza un alambre conductor como referencia de nivelación, un hundimiento de dicho alambre entre los postes de apoyo también puede ser causa de ondas largas (véase el apartado 16). Otro factor que contribuye a la rugosidad de las ondas largas es la entrega incorrecta de la mezcla a la pavimentadora, especialmente si el camión de transporte choca contra la pavimentadora o si el conductor del camión mantiene los frenos mientras el camión es empujado por la pavimentadora (véase el apartado 13). Un factor adicional puede ser el estado de la superficie subyacente: las ondas largas pueden ser un reflejo de las ondas del material base.

También se pueden encontrar ondas largas en aquellos puntos en los que el equipo de compactación invierte la dirección. Este problema es más frecuente cuando el espesor de la capa de asfalto es superior a 100 mm (4 pulgadas).

El problema puede agravarse cuando el tamaño máximo del árido utilizado en la mezcla es relativamente pequeño en comparación con el espesor de la capa. Las ondas son causadas por una onda de presión que se forma delante del rodillo cuando la mezcla está blanda.

En términos de diseño de la mezcla, las ondas largas pueden deberse a la segregación de la mezcla de camión a camión y a cambios en la temperatura de la mezcla (véase el apartado 3). Ambas deficiencias hacen que varíen las fuerzas sobre la regla, dando lugar a una superficie ondulada. El equipo de compactación también puede crear una capa o estera ondulada si el operador del rodillo gira o invierte la máquina demasiado bruscamente.

La rugosidad o el "ondulaciones o efectos de lavado" suelen deberse a un funcionamiento incorrecto de un rodillo vibratorio (véase el apartado 18). Este tipo de equipo debe funcionar a una frecuencia lo más alta posible y a una amplitud relacionada con el grosor de la capa que se está compactando (normalmente, una amplitud mayor para una capa de mezcla más gruesa y una amplitud menor para una capa más fina). Además, el efecto de tabla de lavar puede ser peor si el rodillo funciona a alta velocidad, especialmente si el ajuste de frecuencia es inferior a 2.400 vibraciones por minuto.

Soluciones

Las ondas cortas (ondulaciones) sólo pueden eliminarse evitando su formación. El factor más importante para prevenir las ondas cortas es mantener la cantidad de mezcla (cabeza de material) delante de la regla lo más constante posible. Además, la rigidez de la mezcla, que está relacionada tanto con su temperatura como con su composición, debe mantenerse lo más constante posible. La cantidad de mezcla se controla ajustando correctamente las compuertas de flujo de la tolva y manteniendo los transportadores de listones y los sinfines en funcionamiento la mayor parte del tiempo posible (cerca del 100%) mientras la máquina avanza. La rigidez de la mezcla se controla en la planta de asfalto manteniendo la temperatura de la mezcla, la gradación de los áridos y el contenido de fluidos (contenido de asfalto más contenido de humedad) tan constantes como sea posible. Cualquier factor que haga variar el volumen o la rigidez de la mezcla en la regla puede provocar ondas cortas u ondulaciones en la capa o estera de MAC.

Las ondas superficiales causadas por problemas con los controles automáticos de nivelación pueden detectarse desconectando los controles de nivelación y determinando si las ondas continúan formándose. Si los controles de nivelación son defectuosos, debe consultarse el manual de funcionamiento y mantenimiento suministrado con dichos controles para determinar la acción correctiva adecuada. Las depresiones en la referencia de un alambre conductor pueden detectarse observando la línea a medida que el sensor de nivelación pasa a lo largo de la línea. Las ondas cortas o largas causadas por el estado mecánico o el funcionamiento de la regla de la pavimentadora pueden detectarse normalmente mediante una observación cuidadosa de la pavimentadora durante la colocación de la mezcla. Las ondas largas formadas por el funcionamiento incorrecto del camión de transporte o del equipo de compactación también pueden detectarse fácilmente observando esas operaciones.

Si el lavado se debe a un funcionamiento incorrecto de un rodillo vibratorio, deberá modificarse uno o varios de los siguientes elementos: el ajuste de la amplitud vibratoria, la frecuencia vibratoria y la velocidad del rodillo.

Efectos sobre el rendimiento

El comportamiento a largo plazo del pavimento se ve afectado por las ondas superficiales, tanto cortas como largas, de dos maneras. En primer lugar, las olas reducen la suavidad del pavimento, lo que disminuye la calificación del estado del pavimento o el índice de servicio actual de la calzada. Sin embargo, el comportamiento estructural del pavimento sólo cambiará si las olas son lo suficientemente severas como para aumentar la carga dinámica o de impacto del pavimento bajo el tráfico de camiones pesados. En segundo lugar, las ondas cortas y los factores que las provocan pueden afectar a los niveles de densidad del pavimento. Una mezcla blanda es generalmente más difícil de compactar adecuadamente que una mezcla estable; el resultado puede ser una disminución de la densidad y el correspondiente aumento del contenido en huecos de aire.

Las "ondulaciones o efectos de lavado" es básicamente una rugosidad que se forma en la superficie del pavimento durante la operación de compactación. Dado que afecta al grado de densidad obtenido durante el proceso de compactación, este tipo de defecto puede reducir significativamente la durabilidad a largo plazo de la capa de pavimentado. Además, el ondulaciones o efectos de lavado contribuyen a que los vehículos que utilizan el pavimento tengan una marcha más dura.

DESGARRO (RAYAS)

Descripción

Existen tres tipos generales de desgarro de la capa asfáltica, o de arrastre de la mezcla asfáltica bajo la regla de la pavimentadora. Los tres tipos se definen por la ubicación de las marcas de desgarro en la capa: (a) en el centro del carril, (b) en los bordes exteriores y (c) en toda lo ancho del carril.

Causas

A veces se puede ver una raya en la caja de engranajes en la superficie de la capa directamente detrás del centro de la regla principal. Esta raya suele tener un ancho de 150 a 200 mm (6 a 8 pulgadas) y normalmente está causada por la falta de mezcla asfáltica que se empuja por debajo de la caja de engranajes del sinfín situada delante del centro de la regla. Esta falta de mezcla puede ser el resultado de un ajuste incorrecto de la compuerta de flujo: no se devuelve suficiente mezcla a la regla. Sin embargo, es más probable que se deba a que falten sinfines de inversión o paletas en los sinfines (situados junto a la caja de engranajes) que se utilizan para forzar la mezcla por debajo de la caja de engranajes, o a que estén desgastados o mal ajustados. (Véase la sección 15.)

A menudo se piensa que una raya en la caja de cambios es un tipo de segregación. Pero no lo es. La textura rugosa de la superficie es el resultado de la falta de mezcla en ese punto del ancho del pavimento: pasa menos mezcla por debajo de la regla en la caja de engranajes del sinfín que por debajo de la regla a ambos lados de la caja de engranajes. La textura más rugosa, o desgarro, hace que la superficie parezca más abierta o segregada. Las estrías de la caja de engranajes son más frecuentes con mezclas más ásperas: las que contienen áridos de mayor tamaño, más áridos triturados o menos cantidad de asfalto.

Una raya central también puede deberse a un ajuste incorrecto de la corona en la regla principal de la pavimentadora. La aparición de estrías detrás de la regla se debe principalmente a una relación incorrecta entre las coronas de los bordes anterior (delantero) y posterior (trasero) de la regla. Un desgarro o textura abierta de aproximadamente un metro (varios pies) de ancho en el centro de la alfombra puede deberse a la falta de corona delantera en la regla. Por el contrario, un desgarro o textura abierta a lo largo de ambos bordes exteriores de la mezcla asfáltica suele deberse a un exceso de corona de plomo en la regla. Para la mayoría de las mezclas, la corona de plomo de la regla debe ser ligeramente superior [aproximadamente 3 mm (1⁄8 pulg.)] a la corona de cola. Una relación adecuada entre las coronas delantera y trasera dará como resultado una textura uniforme de la capa en todo su ancho. Las estrías en los bordes pueden deberse a un ajuste incorrecto de la compuerta de flujo o a una instalación incorrecta de las extensiones de la regla. También pueden producirse desgarros parciales si la chapa de la regla está fría y no se ha precalentado uniformemente antes de iniciar el extendido (véase el apartado 15).

El desgarro de toda la anchura de la estera puede atribuirse a varios factores. Uno de ellos son las planchas de la regla deformadas o desgastadas. Otro es que la velocidad de avance de la pavimentadora sea demasiado alta para una mezcla determinada. El uso de una mezcla con áridos de gran tamaño en comparación con el grosor de la capa también puede ser responsable del desgarro de toda la capa. Una buena regla general para la relación entre el tamaño máximo de los áridos en la mezcla y el espesor mínimo de la capa compactada es que la profundidad de la capa compactada debe ser al menos dos veces el tamaño mayor de las partículas de árido grueso o tres veces el tamaño máximo nominal de los áridos. Así, una mezcla que contenga un tamaño máximo de árido de 19,0 mm (3⁄4 pulg.) [tamaño máximo nominal de árido de 12,5 mm (1⁄2 pulg.)] debe colocarse con un espesor mínimo de 38 mm (1 $^{1}/_{2}$ pulg.). Por último, las temperaturas frías de la mezcla, especialmente cuando se combinan con una solera pavimentadora fría, pueden afectar significativamente a la cantidad de desgarro que se produce. (Véase el apartado 15.)

Soluciones

Por lo general, una racha en la caja de engranajes sólo puede eliminarse cambiando la cantidad de mezcla que se empuja bajo la regla en la caja de engranajes del sinfín. Este cambio se realiza instalando paletas inversas o sinfines inversos a cada lado de la caja de engranajes para empujar más mezcla bajo la caja de engranajes. Si la pavimentadora ya está equipada con estos dispositivos, se debe comprobar si están desgastados y es necesario sustituirlos.

Por lo general, el desgarro constante de la alfombra en el centro o en el borde exterior puede eliminarse ajustando la relación entre las coronas delantera y trasera de la regla pavimentadora. Si este cambio no resuelve el problema, deberá modificarse el ajuste de las compuertas de flujo de la pavimentadora. El desgarro en toda la anchura puede eliminarse aumentando la temperatura de la mezcla, precalentando adecuadamente la regla antes de iniciar el extendido, sustituyendo las planchas de la regla alabeadas o desgastadas, o aumentando el espesor de extendido.

Efectos sobre el rendimiento

El desgarro de la capa afecta al rendimiento del pavimento a largo plazo al provocar cambios en la densidad de las zonas en las que se ha producido el desgarro. Las zonas desgarradas pueden parecer segregadas y suelen presentar deficiencias en la cantidad de mezcla. El rendimiento del pavimento se reducirá en relación con el grado en que el desgarro reduzca la densidad y aumente el contenido de aire vacío de la capa. Además, las zonas desgarradas serán más susceptibles al raspado y a los efectos de la humedad (desprendimiento).

TEXTURA NO UNIFORME

Descripción

La textura no uniforme de la capa (véase la Figura 19-1) puede describirse como diferencias en el aspecto de la mezcla, tanto transversal como longitudinalmente, a medida que se coloca y se compacta. Normalmente, se apreciarán pequeñas diferencias en la textura de la superficie debido a las diferencias en la alineación de las partículas de árido grueso de mayor tamaño a medida que la mezcla sale por debajo de la regla pavimentadora. Además, una mezcla con un mayor contenido de árido fino (arena) tendrá una textura superficial más uniforme que una mezcla que contenga un mayor porcentaje de árido grueso.

Causas

Muchos factores relacionados con el funcionamiento de la pavimentadora de asfalto afectan a la uniformidad de la textura de la superficie de la mezcla. (Véase la Sección 15.) Una cantidad variable de mezcla contra la regla, causada por la sobrecarga de los sinfines o el funcionamiento de la tolva vacía entre cargas de camión, puede causar variaciones en la cantidad de mezcla metida bajo la regla y producir así una textura no uniforme. Un mantenimiento inadecuado de la regla, como placas de la regla desgastadas o sueltas o extensiones de la regla mal instaladas, así como una baja frecuencia de vibración de la regla, pueden alterar la textura de la capa y provocar falta de uniformidad. Además, una baja temperatura de la mezcla, causada por problemas en la planta o porque la pavimentadora permanece demasiado tiempo entre cargas de mezcla, puede ser un factor de textura irregular de la capa, especialmente si la regla de la pavimentadora también está fría. El desgarro que se produce cuando el espesor de la capa compactada es inferior al doble de la dimensión de las partículas de árido más grandes (como se ha comentado anteriormente) es otro factor que contribuye.

Una base blanda o que cede bajo la capa que se está construyendo puede hacer que la nueva capa tenga una textura superficial variable (ver Sección 14). Además, la segregación de la mezcla causada por un mal diseño de la mezcla (Sección 3) o una manipulación inadecuada de la mezcla durante las operaciones de mezclado (Sección 3), carga (Sección 11), acarreo (Sección 11), descarga (Sección 13) o colocación (Sección 15) puede contribuir a una textura superficial no uniforme. La variabilidad de la textura también se verá afectada por cualquier factor que cause falta de uniformidad en la mezcla, como desviaciones en la gradación de los áridos, el contenido de asfalto o la temperatura de la mezcla (véase la Sección 3).

FIGURA 19-1 Textura no uniforme de la capa tras la compactación.

Soluciones

Las soluciones para la textura superficial no uniforme son tan variadas como las causas. Debe vigilarse de cerca el funcionamiento de la pavimentadora, especialmente en lo que respecta a la necesidad de una cabeza constante de material delante de la regla. Tanto la pavimentadora como la regla deben estar bien mantenidas y en buenas condiciones de funcionamiento.

El espesor compactado de la capa colocada debe diseñarse de forma que sea al menos el doble del tamaño de las partículas de árido grueso más grandes incorporadas a la mezcla. Por último, una mezcla que sea blanda, variable en la gradación de los áridos o en el contenido de asfalto, o que se segregue con facilidad, deberá modificarse para aumentar su rigidez y mejorar sus propiedades antes de que se produzca en la planta y se entregue a la pavimentadora para su colocación.

Efectos sobre el rendimiento

La textura superficial no uniforme suele ir asociada a una densidad no uniforme. El mismo esfuerzo de compactación conseguirá, por lo general, una menor densidad en las zonas en las que el árido grueso ha sido arrastrado por la regla pavimentadora o se ha producido segregación de la mezcla, en comparación con las zonas que tienen una textura superficial uniforme. A medida que disminuye la densidad y aumenta el contenido de huecos de aire, la durabilidad y la capacidad de servicio de la capa asfáltica disminuyen notablemente.

MARCAS DE ROTURA

Descripción

Las marcas de la regla son hendiduras transversales en la superficie de la capa asfáltica. Se producen cuando la pavimentadora se detiene entre cargas de mezcla. Dependiendo de la mezcla que se coloque, algunas marcas de la regla son apenas perceptibles, mientras que otras son muy marcadas y profundas. Las marcas de la regla también pueden producirse en dirección longitudinal cuando se utilizan extensiones rígidas o hidráulicas y la elevación de la extensión no es la misma que la de la regla principal

Causas

Las marcas transversales de la regla pueden deberse a varias causas (véase el apartado 15 sobre el funcionamiento de la regla). Estas marcas también se producen cuando la regla se coloca de forma incorrecta y se desplaza fuertemente sobre su parte trasera. Si la mezcla asfáltica es blanda y la pavimentadora está equipada con una regla muy pesada, como extensiones hidráulicas con extensiones rígidas adicionales acopladas, la regla tenderá a asentarse en la mezcla y dejará marcas. Si se da alguna de estas causas, las marcas de la regla serán visibles cada vez que se detenga la pavimentadora.

Otra causa es que el camión de transporte choque con la pavimentadora al prepararse para descargar la mezcla o que el conductor del camión mantenga los frenos cuando la pavimentadora empiece a empujar el camión. En estos casos, las marcas de la regla sólo aparecerán cuando el intercambio camión-pavimentadora sea incorrecto.

Las marcas longitudinales de la regla se deben a un ajuste incorrecto de las extensiones de la regla con respecto a la regla principal. Cuando se utilizan extensiones, su posición vertical y su ángulo de ataque deben ser los mismos que los de la regla principal. Si las extensiones rígidas se ajustan a una elevación incorrecta, se producirá una marca longitudinal en el punto donde se unen las diferentes secciones de la regla. Si se utilizan extensiones hidráulicas, pueden producirse dos marcas longitudinales: una en el extremo de la regla principal y otra en el borde interior de la extensión a cada lado de la máquina.

Soluciones

Si las marcas transversales de la regla se deben al estado mecánico o a una configuración incorrecta de la regla de la pavimentadora, deberá repararse la regla. Si las marcas se deben a que el camión choca contra la pavimentadora, deberá modificarse la operación de extendido para que la pavimentadora recoja al camión de transporte en lugar de que el camión retroceda hacia la pavimentadora. Además, una vez que la pavimentadora haya entrado en contacto con el camión, el conductor del camión deberá aplicar sólo la presión suficiente en los frenos para mantener el camión en contacto con la pavimentadora.

En algunos casos, sobre todo si la mezcla es muy blanda, las marcas de la regla pueden eliminarse si no se detiene la pavimentadora entre cargas de mezcla. Esto puede lograrse utilizando un elevador de hileras o un vehículo de transferencia de material para entregar la mezcla a la tolva de la pavimentadora. Sin embargo, si se utilizan camiones volquete para transportar la mezcla, generalmente es mejor detener la pavimentadora entre las cargas de material (deteniendo y volviendo a arrancar la pavimentadora tan rápido como sea posible) en lugar de permitir que el operador de la pavimentadora deje secar la tolva de la pavimentadora, reduzca la cabeza de mezcla delante de la regla de la pavimentadora y aumente la oportunidad de segregación de carga a carga.

Para conseguir una textura uniforme de la superficie, la elevación y el ángulo de ataque de las extensiones de la regla deben coincidir con los de la regla principal. Las marcas longitudinales de la regla causadas por un ajuste incorrecto de la elevación de las extensiones pueden eliminarse corrigiendo la posición de cada extensión con respecto a la de la regla principal. Puede ser necesario ajustar tanto la posición vertical como el ángulo de ataque de las extensiones. Estos ajustes deben realizarse siempre que se utilicen extensiones hidráulicas o rígidas.

Efectos sobre el rendimiento

Las marcas transversales de la regla no suelen ser perjudiciales para la durabilidad de la capa. Sin embargo, pueden afectar a la conducción al crear un bache siempre que el equipo de compactación no pueda eliminar completamente las marcas. En muchos casos, las marcas de la regla afectan menos al rendimiento de la mezcla que la ralentización y el arranque de la pavimentadora cuando el operario intenta mantenerla en movimiento mientras el camión vacío se aleja y el camión cargado retrocede hacia la tolva.

Las marcas longitudinales de la regla indican que el nivel de la mezcla bajo las extensiones de la regla es diferente del que hay bajo la regla principal. Si las marcas de la regla son pronunciadas, puede producirse una compactación diferencial a través de la marca o “junta”, con el equipo de compactación montando inicialmente sobre la capa más alta. Las marcas pueden dejar un reborde en la mezcla si no se pueden extender completamente.

CAPACIDAD DE RESPUESTA DE LA REGLA

Descripción

Al cambiar las manivelas de control de espesor de la regla, el ángulo de ataque de la regla aumenta o disminuye. Cuando la pavimentadora avanza para colocar la mezcla, la regla se desplaza hacia arriba o hacia abajo hasta el nuevo punto de equilibrio para el nuevo espesor de la capa. Cuando la regla no responde a los cambios en el ajuste de las manivelas de control de espesor, el operador no puede modificar la profundidad de la capa que se está colocando. La pavimentadora también pierde su capacidad inherente, a través del principio de la regla flotante, de proporcionar la acción autonivelante necesaria para colocar una capa de asfalto uniforme.

Causas

Una velocidad extremadamente alta de la pavimentadora [más de 25 m (83 pies) por minuto para capas finas o más de 15 m (50 pies) por minuto para capas de más de 63 mm (2 $^1/_2$ pulg,) de espesor] puede provocar una falta de capacidad de reacción de la regla (véase el apartado 15). El estado mecánico de la regla influye en su capacidad de reacción. Si la regla se desplaza sobre sus cilindros de elevación o si hay conexiones sueltas en las manivelas de control de espesor, la regla no reaccionará. Si se utilizan controles de nivelación automáticos (véase el apartado 16), una ubicación incorrecta del sensor hará que la regla no pueda reaccionar a las señales de entrada de los sensores de nivelación.

Si el tamaño máximo del árido utilizado en la mezcla es demasiado grande en comparación con la profundidad de la mezcla que se está colocando, la regla se desplazará sobre los trozos de árido más grandes o los arrastrará. Como resultado, la regla será incapaz de cambiar su ángulo y, por lo tanto, no responderá a los cambios en los ajustes de control de espesor. Las variaciones en la temperatura de la mezcla también harán que la regla no responda a los cambios en el ángulo de ataque, ya que las propias variaciones de rigidez de la mezcla harán que la regla busque continuamente nuevos niveles de equilibrio para las fuerzas que actúan sobre ella.

Soluciones

La pavimentadora y la regla deben estar en buenas condiciones de funcionamiento. El sensor de los controles automáticos de nivelación no debe estar situado en los puntos de remolque ni detrás de los puntos de giro de la regla, sino en la zona comprendida entre un tercio y dos tercios de la longitud de los brazos niveladores. la textura de la mezcla es uniforme (lo que indica una relación adecuada entre el espesor de la capa y el tamaño máximo de los áridos), la regla podrá responder a los cambios en los ajustes del control de espesor.

Efectos sobre el rendimiento

Una regla que no reacciona provoca una capa de asfalto rugosa. La regla es incapaz de reaccionar a los cambios manuales en los ajustes de espesor. También pierde su capacidad de auto nivelación en una superficie de pavimento existente porque no puede reducir el espesor de mezcla colocado sobre los puntos altos de esa superficie y aumentar el espesor colocado en las zonas bajas. Por lo tanto, la capacidad de carga de la capa que se está colocando puede verse afectada significativamente si la regla pavimentadora no responde.

SOMBRAS DE SUPERFICIE (SINFÍN)

Descripción

Las sombras de superficie (sinfín) son zonas oscuras que aparecen en la superficie de una mezcla de MAC. En la mayoría de los casos, las sombras no se pueden ver hasta algún tiempo después de que el pavimento ha sido utilizado por el tráfico y parte de la película de cemento asfáltico se ha desgastado de las partículas de agregado expuestas por los neumáticos de los vehículos. Las sombras superficiales se ven más fácilmente cuando el sol está bajo en el horizonte y el pavimento se ve mirando hacia el sol. Las sombras también son visibles cuando la superficie del pavimento está húmeda o cuando la superficie se ve desde el arcén de la carretera por la noche y los faros de los vehículos brillan sobre la superficie.

En casos graves, las sombras superficiales pueden ser visibles inmediatamente detrás de la regla durante la operación de extendido. Incluso en este último caso, las sombras desaparecerán cuando la mezcla esté siendo compactada por los rodillos, para volver a ser visibles más tarde en las condiciones descritas anteriormente. Las sombras pueden ocupar en todo lo ancho del carril que se está colocando o sólo parte del ancho. La extensión de las sombras depende del modo de funcionamiento de la pavimentadora, en particular del tiempo de conexión y desconexión de los sinfines a cada lado de la máquina.

Causas

Las sombras superficiales se deben principalmente a la sobrecarga de los sinfines de la pavimentadora (véase el apartado 15). Si la cabeza de material en la cámara del sinfín es lo suficientemente grande como para “enterrar” los sinfines, la regla reaccionará a las fuerzas variables que actúan sobre ella. La separación entre las sombras corresponderá normalmente al arranque de los sinfines cuando se opere de forma parada-arranque. Siempre que la cantidad de mezcla delante de la regla esté a la altura o por encima de la parte superior de los sinfines, se formarán las sombras que se verán más adelante en el pavimento.

En la mayoría de las pavimentadoras es posible ajustar la distancia entre la regla y el tractor. Esto se consigue soltando las conexiones de los brazos niveladores o de remolque de la pavimentadora y moviendo el tractor hacia delante (o hacia atrás) mientras la regla permanece inmóvil sobre la superficie del pavimento. Dependiendo de la marca y el modelo de la pavimentadora, suele haber una longitud de deslizamiento de 100 mm (4 pulgadas) para la conexión de la regla. La gravedad de las sombras superficiales puede aumentar con la regla en posición trasera - cuando se transporta más mezcla en la cámara del sinfín y los sinfines se sobrecargan.

Se cree que las sombras son el resultado de un ligero aumento de la densidad de la mezcla causado por el reinicio de los sinfines y el subsiguiente forzamiento de mezcla adicional bajo la regla. No hay ninguna diferencia en la textura de la superficie asociada a la ubicación de las sombras superficiales; sólo pueden verse desde un ángulo. Su intensidad suele aumentar cuando se está colocando una mezcla blanda.

Soluciones

La mezcla de HMA transportada en la cámara del sinfín debe mantenerse a un nivel cercano al centro del eje del sinfín. Esto significa que las compuertas de flujo deben ajustarse de forma que los sinfines funcionen lo más cerca posible del 100% del tiempo y se minimicen las paradas y arranques de los sinfines. En ningún caso la parte superior de los sinfines debe estar completamente cubierta de mezcla. Además, la posición de la regla debe ser lo más adelantada posible para reducir la cantidad de material en la cámara del sinfín y mantener al mínimo la cabeza de material delante de la regla. La regla no debe colocarse en posición trasera a menos que se esté colocando una mezcla de piedras grandes [una en la que el tamaño máximo del árido sea superior a 37,5 mm (1 1⁄2 pulg., uno y un medio)].

Efecto sobre el rendimiento

Las sombras superficiales no son necesariamente perjudiciales para el rendimiento de la mezcla, excepto por un efecto menor sobre la capacidad de carga. La diferencia en la densidad de la mezcla en zonas con sombras y entre ellas no suele ser lo suficientemente grande como para determinarla con precisión. La principal preocupación con las sombras superficiales es la apariencia visual de la mezcla para los conductores de vehículos.

PRECOMPACCIÓN DEFICIENTE

Descripción

Una pavimentadora de asfalto moderna suele estar equipada con una regla vibratoria. Este tipo de regla permite que la mezcla se compacte parcialmente a medida que pasa por debajo de la regla. Dependiendo de variables tales como la velocidad de avance de la pavimentadora, el espesor de la capa, la temperatura de la mezcla y las condiciones ambientales, la densidad de la mezcla asfáltica medida detrás de la regla antes de la compactación suele situarse entre el 70% y el 80% de la densidad máxima teórica (mezcla sin huecos).

Unas pocas pavimentadoras están equipadas con reglas combinadas, que disponen tanto de barras pisón como de vibradores. A velocidades bajas de la pavimentadora, la regla combinada suele lograr una mayor compactación de la mezcla que la obtenida con la regla vibratoria sola. Sin embargo, a velocidades de la pavimentadora superiores a 7,5 m (25 pies) por minuto, el mayor esfuerzo de compactación conseguido con la barra del pisón suele perderse, y el grado de compactación obtenido es similar al conseguido con una regla vibratoria simple.

Causas

La cantidad de precompactación conseguida con la regla disminuye a medida que aumenta la velocidad de la pavimentadora (véase el apartado 15). En general, la precompactación aumenta ligeramente al aumentar la frecuencia de vibración de la regla. Sin embargo, la precompactación disminuye considerablemente si la regla se desplaza sobre los cilindros de elevación de la regla, lo que limita el esfuerzo de compactación disponible. El nivel de precompactación obtenido también se ve limitado si la capa es demasiado fina para el tamaño máximo de árido utilizado en la mezcla (menos del doble del árido de mayor tamaño; véase el análisis anterior de la textura no uniforme), si la mezcla que se está colocando está demasiado fría o si la base sobre la que se está colocando la nueva capa es blanda y cede.

Soluciones

La disminución de la velocidad de la pavimentadora y el aumento de la frecuencia de vibración de la regla deberían, dentro de unos límites, aumentar el nivel de precompactación alcanzado durante la operación de extendido. En algunas pavimentadoras también es posible aumentar la amplitud de la vibración para incrementar la fuerza de impacto de la regla sobre la mezcla. Un mantenimiento adecuado de la regla ayuda también a obtener un esfuerzo de compactación uniforme de la regla.

Efectos sobre el rendimiento

Siempre que se obtenga el nivel de densidad requerido utilizando rodillos convencionales detrás de la pavimentadora, el nivel de precompactación conseguido por la regla no afectará al rendimiento a largo plazo de la capa de HMA. Sin embargo, es posible reducir el número de pasadas de rodillo necesarias para cumplir los criterios de densidad y contenido de aire vacío si la cantidad de precompactación obtenida por la regla es mayor. Además, el aumento de la densidad de precompactación puede reducir la cantidad de compactación diferencial que se produce en los puntos bajos y en las zonas bacheadas.

PROBLEMAS DE JUNTA

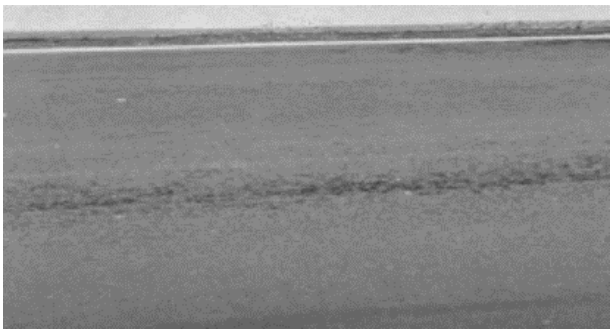


FIGURA 19-2 Junta longitudinal deficiente debido a una mano de obra insatisfactoria.

Las juntas transversales deficientes se asocian a un bache en la junta, a un hundimiento de la superficie del pavimento varios metros (pies) más allá de la junta, o a ambas cosas. Las juntas longitudinales deficientes (Figura 19-2) entre pasadas de la pavimentadora se caracterizan normalmente por una diferencia de elevación entre los dos carriles, por un raspado de la mezcla asfáltica en la junta, o por ambas cosas. La zona adyacente a la junta longitudinal suele estar deprimida por debajo del nivel de la superficie del pavimento circundante.

Causas

Los problemas en las juntas se deben a una mala construcción de la junta, a una compactación inadecuada del aglomerado colocado a lo largo de la junta, a procedimientos incorrectos de puesta en marcha cuando se reanuda el extendido tras una parada, o a una construcción y retirada incorrectas de los conos (conos se refiere a la conicidad).

Soluciones

Una de las claves para conseguir una buena junta transversal es construir la junta al final de la jornada de extendido en un punto de la capa en el que el espesor de la capa sea constante. (Esto significa que el espesor compactado de la capa al final de la pavimentadora es el mismo que el de la capa/estera colocada anteriormente.

Al comienzo de la pavimentación del día siguiente, la solera pavimentadora debe colocarse sobre bloques en el lado frío de la junta transversal. El grosor de los bloques debe estar relacionado con la profundidad de la capa que se está colocando: aproximadamente 5 mm (1⁄4 pulg.) de grosor por cada 25 mm (1 pulg.) de grosor de capa compactada. A continuación, el borde delantero de la regla pavimentadora debe colocarse directamente sobre la cara vertical de la junta. Una vez que la pavimentadora se separa de la junta, la cantidad correcta de mezcla debería estar en el lugar correcto, y normalmente sólo es necesario un rastrillado mínimo, si es que lo hay. La mezcla en la junta debe compactarse lo más rápidamente posible.

Para la construcción de juntas longitudinales, es extremadamente importante compactar adecuadamente el borde del primer carril. Para ello es necesario que el rodillo de acero vibratorio o estático sobresalga unos 150 mm (6 pulg.) por encima del borde no confinado de la capa. Esta práctica proporciona el mayor esfuerzo de compactación a lo largo del borde no confinado sin causar un desplazamiento lateral indebido de la mezcla a lo largo del borde del pavimento.

Al colocar el segundo carril (adyacente) del pavimento, la placa final de la regla pavimentadora debe solapar el primer carril de 25 a 40 mm (1 a 1 $^{1}/_{2}$pulg., es decir, uno y un medio). Se debe realizar un rastrillado mínimo, si lo hubiera, en la mezcla colocada sobre el primer carril. Los rodillos - vibratorio, neumático y rueda de acero estática - deben operar en el lado caliente de la junta y extenderse sobre la junta en el lado frío aproximadamente 150 mm (6 pulg.). Deberá realizarse el mismo número de pasadas de rodillo sobre la junta longitudinal que sobre cada punto del interior de la capa de MAC.

Efectos sobre el rendimiento

Una junta transversal deficiente no afectará al rendimiento del pavimento en un grado significativo si el equipo de compactación obtiene niveles de densidad adecuados. Por lo general, el único resultado negativo será un mal desplazamiento. Sin embargo, una junta longitudinal mal construida puede disminuir seriamente la capacidad de servicio de la estructura del pavimento. Una junta mal colocada y compactada se rastrillará y hará que un lado de la junta quede más bajo que el otro. Si el nivel de densidad es demasiado bajo, todo el espesor de la capa de pavimento en la junta longitudinal puede desgastarse bajo la acción del tráfico. Una junta deficiente también será porosa, permitiendo la entrada de agua en las capas de pavimento subyacentes.

FISURACIÓN

Descripción

Las fisuras pueden definirse como grietas transversales cortas, generalmente de 25 a 75 mm (1 a 3 pulg.) de longitud y separadas 25 a 75 mm (1 a 3 pulg.), que se producen en la superficie de la capa de MAC en algún momento durante el proceso de compactación (véanse las figuras 19-3 y 19-4). Las grietas no son visibles inmediatamente detrás de la regla pavimentadora. Raramente se producen durante la primera o segunda pasada del equipo de compactación sobre la capa. Si se produce, normalmente tendrá lugar después de que la mezcla se haya enfriado a una temperatura inferior a 115°C (240°F) y se realicen pasadas adicionales de

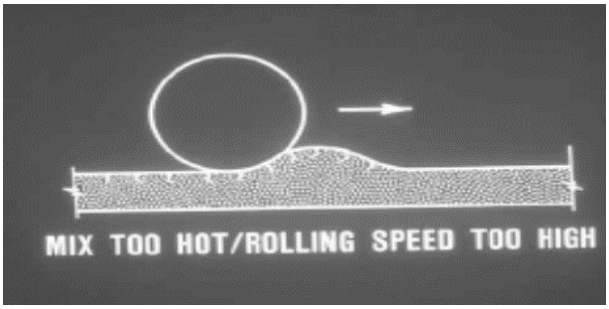


FIGURA 19-3 fisuración del rodillo durante la compactación.

rodillos vibratorios o de ruedas de acero estáticas (o ambos) sobre la capa. No suele producirse cuando la mezcla se compacta con un rodillo neumático.

La mayoría de las mezclas de MAC no se fisuran en absoluto durante la compactación, mientras que otras presentan características blandas y se fisuran con facilidad. A medida que el fisuramiento se agrava, las grietas se hacen más largas y están más próximas entre sí. Las grietas no se extienden completamente a través de la profundidad de la capa, sino que son sólo de 10 a 13 mm (3⁄8 a 1⁄2 pulg.) de profundidad.

Causas

Una mezcla que se fisura durante la compactación es una mezcla blanda. La mezcla empuja o se mueve delante de los tambores de los rodillos vibratorios o estáticos de acero. Las grietas o fisuras se forman cuando se produce una onda de arco delante de los tambores del rodillo a medida que la mezcla se mueve longitudinalmente antes de que el rodillo llegue a ese lugar.

La fisuración puede deberse a dos factores principales: (a) una deflexión excesiva de la estructura del pavimento bajo el equipo de compactación (véase la Sección 14) y (b) una o más deficiencias en el diseño de la mezcla asfáltica (véase la Sección 3). Una mezcla que se fisura no es lo suficientemente estable internamente: no tiene suficiente resistencia interna a temperaturas elevadas para soportar el peso del equipo de compactación durante el proceso de rodadura.

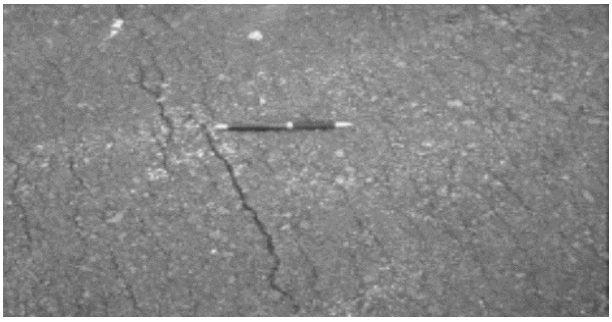


FIGURA 19-4 Grietas capilares causadas por la fisuración del rodillo.

Cuando la causa del problema de fisuración es una cimentación que cede, el pavimento subyacente sobre el que se está colocando la nueva capa de MAC es débil y cede bajo el movimiento del equipo de compactación (véase el apartado 14). El peso de los rodillos hace que las capas de la estructura del pavimento se muevan, empujen y doblen excesivamente, poniendo la nueva mezcla en tensión en su superficie. Las marcas de comprobación se forman entonces cuando la superficie de la nueva MAC se separa al desviarse la estructura del pavimento durante la operación de rodadura. Las marcas deberían aparecer en la superficie de la nueva mezcla sólo en los lugares en los que se produce un movimiento de la estructura del firme bajo el equipo de compactación. Si, por ejemplo, la pavimentadora pasa por encima de un punto blando de la estructura subyacente, la fisuración deberá producirse sólo donde exista dicho punto blando.

Una causa más común de fisuración es una o más deficiencias en la mezcla de MAC: (a) un exceso de fluidos en la mezcla: demasiado cemento asfáltico o demasiada humedad en la mezcla, o ambos; (b) una joroba en la curva de gradación de la arena - demasiado material de arena de tamaño medio [tamaño de tamiz 1.18 mm y 0.600 mm (nº 16 y nº 30)] y demasiado poco material de arena fina [tamaño de tamiz 0.300 mm y 0.150 mm (nº 50 y nº 100)]. 18-mm y 0.600-mm (No. 16 y No. 30) tamaño de tamiz] y demasiado poco material de arena fina [0.300-mm y 0.150-mm (No. 50 y No. 100) tamaño de tamiz]; y (c) una falta de espacio en la gradación de áridos para el cemento asfáltico (bajo VMA).

Un exceso de fluidos en la mezcla de MAC hace que la mezcla sea blanda y permite que se desplace fácilmente bajo el esfuerzo de compactación aplicado por los rodillos. La mezcla será blanda si el contenido de ligante es demasiado alto para la gradación y las características del árido utilizado, especialmente si la mezcla tiene un bajo contenido de VMA. Si la mezcla contiene demasiada humedad debido a que el árido no se ha secado completamente al pasar por la secadora de la planta o por el tambor mezclador (flujo paralelo o contracorriente), el exceso de humedad actuará como cemento asfáltico a temperaturas elevadas y sobre lubricará la mezcla. La humedad restante en los poros del árido impedirá que el material ligante entre en esos poros del árido, dejando en efecto más material ligante entre las partículas del árido en lugar de parcialmente dentro del árido.

Si la blandura se debe a un exceso de cemento asfáltico en la mezcla, deberá comprobarse la mezcla a diario. Si la blandura se debe a un exceso de humedad en la mezcla, la fisuración debe realizarse siempre que la planta no funcione correctamente. Por ejemplo, se puede comprobar la mezcla el día después de una lluvia, pero no el día anterior. Si las operaciones en la planta de asfalto no incluyen la eliminación de la humedad extra

en el árido resultante de la lluvia en los acopios, esa humedad se añadirá a los fluidos del ligante asfáltico y provocará que la mezcla esté blanda.

Una joroba en la curva de gradación de los áridos finos - un exceso de arena de tamaño medio en la mezcla - también puede hacer que la mezcla sea blanda. Además, las mezclas con bajo contenido en VMA serán generalmente blandas y se moverán fácilmente bajo la fuerza de un rodillo vibratorio o estático de rueda de acero. Además, las diversas características de las partículas de áridos, como la textura de la superficie, la angulosidad, las caras aplastadas y la cantidad de recubrimiento de polvo, pueden desempeñar un papel importante en la cantidad de fisuración que se produce durante la compactación. Las mezclas que son deficientes en la gradación del árido fino o que carecen de un contenido adecuado de VMA normalmente se fisuraran continuamente, no periódicamente. Sin embargo, si la gradación de la arena es variable, la comprobación puede producirse sólo cuando la gradación de la arena sea inadecuada.

Las anteriores deficiencias de la mezcla se agravan, y la cantidad de fisuración que se produce puede aumentar, cuando la temperatura de la mezcla es demasiado alta para el grado concreto de cemento asfáltico que se utiliza en la mezcla. A medida que la temperatura de la mezcla aumenta, la viscosidad del cemento asfáltico disminuye, haciendo que la mezcla sea más blanda. Un factor adicional que puede afectar a la cantidad de grietas es la susceptibilidad a la temperatura del propio cemento asfáltico - cuanto mayor sea el grado de susceptibilidad a la temperatura del material ligante, más grietas pueden producirse en la mezcla de MAC.

Ocasionalmente, las diferencias de temperatura dentro de una capa de mezcla de MAC pueden provocar la aparición de grietas (grietas por calor). En un día frío y bajo condiciones de viento, la temperatura de la mezcla que está en contacto con la superficie del pavimento existente puede disminuir rápidamente. La superficie superior de la mezcla también se enfriará rápidamente. Sin embargo, la temperatura de la mezcla en el centro de la capa seguirá siendo alta. Esta diferencia de temperatura puede hacer que la mezcla se compruebe bajo el esfuerzo de compactación de los rodillos.

También hay una serie de causas secundarias de fisuración. Una de ellas es una mezcla cuya temperatura es demasiado alta: la mezcla se sobrecalentó en la planta. Además, las técnicas de laminado inadecuadas pueden causar grietas: laminar demasiado rápido, parar demasiado rápido, hacer giros bruscos sobre la capa caliente, o hacer un número excesivo de pasadas con el rodillo de acabado o terminar de laminar cuando la capa está todavía a una temperatura demasiado alta (véase el apartado 18). Por último, la formación de grietas puede aumentar por una mala adherencia entre la nueva estera y la superficie subyacente debido a una superficie sucia o a la falta de una capa de adherencia.

Soluciones

Si la causa de las fisuras es la presencia de una base que cede debajo de la nueva capa de MAC, la solución consiste en reparar y preparar adecuadamente la estructura del pavimento existente antes de colocar la nueva capa de MAC. Deben eliminarse y sustituirse los puntos blandos. Se deben eliminar y reemplazar o estabilizar todas las áreas de deflexión excesiva. Se necesita un soporte uniforme en la estructura de pavimento subyacente para que las nuevas capas de pavimento funcionen adecuadamente.

Si la causa de la fisuración es una deficiencia en el diseño de la mezcla -un exceso de fluidos en la mezcla o un problema con la gradación del árido fino o el contenido de VMA de la mezcla-, la solución a largo plazo es cambiar las propiedades de la mezcla. Estos cambios deben realizarse en la planta de asfalto y no en el lugar de extendido. Si la mezcla contiene un exceso de fluidos, ya sea cemento asfáltico o humedad, debe reducirse el contenido de ligante o secarse adecuadamente el árido para eliminar toda la humedad. En algunos casos, será necesario reducir el ritmo de producción de la planta para eliminar completamente la humedad del árido. En otros casos, puede ser necesario modificar las condiciones de funcionamiento de la planta (por ejemplo, las paletas o el ángulo del tambor).

Si la fisuración está causada por la gradación del árido fino incorporado a la mezcla, deberá cambiarse la gradación. Puede ser necesario aumentar o disminuir la cantidad de árido fino utilizado, añadir una pequeña cantidad de árido fino con una gradación diferente, aumentar la angularidad del árido fino, o utilizar un material completamente diferente de una fuente diferente. Si la causa de la comprobación es la falta de VMA en la mezcla de MAC, es necesario realizar cambios para aumentar el VMA.

A menudo se piensa que el bloqueo se debe a que la mezcla está demasiado caliente. Esto es sólo parcialmente correcto; la mezcla está demasiado caliente a algunas temperaturas para soportar el peso del equipo de compactación porque la mezcla carece de resistencia interna y estabilidad. Si la mezcla estuviera correctamente diseñada, no estaría demasiado caliente para ser compactada a ninguna temperatura inferior a unos 150°C (300°F). La mayor parte de las fisuraciones se producen cuando la temperatura de la mezcla disminuye de unos 115°C (240°F) a unos 90°C (190°F); raramente se producen fisuraciones cuando la temperatura de la mezcla es superior a unos 115°C (240°F) o inferior a unos 90°C (190°F).

A corto plazo, se pueden realizar cambios tanto en la zona de rodadura como en el tipo de rodillos utilizados

para densificar la mezcla con el fin de reducir la cantidad de fisuraciones que se producen. Si la mezcla está blanda debido a un exceso de fluidos, a un problema con la gradación de los áridos finos o a la falta de VMA, puede ser posible densificar la mezcla adecuadamente a una temperatura elevada sin provocar la comprobación.

Una mezcla que se fisura es blanda, pero normalmente puede compactarse satisfactoriamente a altas temperaturas, por encima de 120°C (250°F).

Por lo general, el nivel de densidad requerido puede obtenerse si se aplican suficientes pasadas de rodillo a la mezcla antes de que se enfríe hasta el punto en el que comienza el agrietamiento. Esto puede conseguirse utilizando dos rodillos de desglose en lugar de uno, es decir, dos rodillos que funcionen en escalón (uno al lado del otro) en lugar de un rodillo de desglose seguido de un rodillo intermedio. Los dos rodillos de desglose aplican cada uno su esfuerzo de compactación a un lado del carril recién colocado. Se realizan muchas pasadas sobre cada punto de la superficie del pavimento antes de que la mezcla comience a comprobarse. Una vez iniciada la comprobación, el proceso de rodadura se suspende temporalmente.

Si las operaciones de compactación se intentan cuando la mezcla se está moviendo, desplazando y fisurando bajo la acción de rodillos de ruedas de acero vibratorios o estáticos, la mezcla se descompactará en lugar de compactarse. La compactación no debe realizarse con rodillos de acero cuando la mezcla está blanda y en movimiento. La mayoría de las mezclas blandas permanecerán blandas hasta que la superficie de la mezcla se enfríe a una temperatura de aproximadamente 90°C (190°F). A esta temperatura, la mezcla se ha enfriado lo suficiente como para que la viscosidad del ligante asfáltico haya aumentado hasta el punto en que la mezcla pueda soportar de nuevo el peso del equipo de compactación. A continuación, se pueden utilizar rodillos estáticos de rueda de acero para conseguir la densidad final en la mezcla y eliminar cualquier marca de rodillo en la superficie del pavimento.

Cuando una mezcla blanda se encuentra en el rango medio de temperaturas, entre unos 115°C (240°F) y 90°C (190°F), no debe intentarse la rodadura, como se ha comentado anteriormente, ni con rodillos vibratorios ni con rodillos estáticos de ruedas de acero. Sin embargo, se puede utilizar un rodillo neumático en esta zona de temperatura, ya que los neumáticos de caucho de este rodillo normalmente no empujarán la mezcla y no se formará una onda de arco delante de los neumáticos. La mezcla blanda se densificará, en lugar de comprobarse, bajo el esfuerzo de compactación del rodillo neumático. La compactación final con un rodillo estático de ruedas de acero puede completarse una vez que la mezcla se haya enfriado a una temperatura inferior a unos 90°C (190°F).

En la mayoría de los casos, cuando se producen grietas en la mezcla, los operarios de los rodillos tienden a retirar la mezcla y dejar que se enfríe. Este es un enfoque erróneo del problema. Retrasar la compactación permite que la mezcla se enfríe y se endurezca, pero la mayoría de las veces no da tiempo suficiente para que la mezcla alcance el nivel de densidad requerido. Con un aglomerado blando, puede que no sea posible alcanzar ambos objetivos al mismo tiempo (ausencia de comprobaciones y densidad adecuada) si se deja enfriar el aglomerado antes de iniciar las operaciones de laminación. Es mucho mejor compactar la mezcla tanto como sea posible antes de que empiecen las comprobaciones, mantenerse alejado de la mezcla en la zona de temperatura media, cuando es más probable que se produzcan comprobaciones, y luego terminar de pasar el rodillo por la mezcla una vez que se haya enfriado lo suficiente como para soportar el peso del rodillo final.

Si el aglomerado entregado a la pavimentadora está demasiado caliente -por encima de 165°C (325°F)- debe dejarse enfriar después de su extendido antes de iniciar el proceso de compactación. Deberán corregirse las técnicas de extendido inadecuadas. La superficie del pavimento subyacente debe estar limpia y adecuadamente adherida antes de comenzar la colocación de la nueva mezcla.

Ninguna de las soluciones al problema de la comprobación funcionará en todos los casos. Cada mezcla tendrá sus propias características de compactación. En el caso de algunas mezclas extremadamente blandas, la comprobación puede producirse en un rango más amplio de temperaturas, desde tan altas como 130°C (270°F) hasta tan bajas como 75°C (170°F). Como se ha señalado, las mezclas que carecen de estabilidad interna generalmente se comprobarán bajo rodillos de rueda de acero (operados en el modo vibratorio o estático), y por lo tanto estas mezclas deben ser rediseñadas.

Efectos sobre el rendimiento

Aunque las comprobaciones se extienden sólo una corta distancia hacia abajo desde la superficie, son muy perjudiciales para el rendimiento a largo plazo porque las características de la mezcla de licitación afectan al nivel de densidad obtenido. Si los rodillos se mantienen alejados de la pavimentadora en un intento de reducir la cantidad de comprobaciones que se producen, el nivel de densidad obtenido por el equipo de compactación se reducirá normalmente de forma significativa. En consecuencia, aumentará el contenido de huecos de aire de la capa de MAC. Por lo tanto, una mezcla que contenga adherencias carecerá de densidad y tendrá una vida útil muy reducida en condiciones de tráfico.

DESPLAZAMIENTO Y AHUELLAMIENTO

Descripción

El desplazamiento de una capa de MAC es el movimiento de la mezcla en dirección longitudinal. Este desplazamiento puede tener lugar durante la operación de compactación o posteriormente durante el tráfico. En la mayoría de los casos, el empuje durante la construcción va acompañado de una gran onda de presión delante del rodillo de rotura, especialmente si dicho rodillo es vibratorio o estático con ruedas de acero. El desplazamiento también puede producirse junto con la fisuración de la mezcla si ésta es lo suficientemente blanda como resultado de una gradación defectuosa de los áridos o de un exceso de contenido de fluidos (ligante asfáltico o humedad). Finalmente, el desplazamiento de la capa o de la mezcla puede ocurrir en el punto de inversión de los rodillos, especialmente en el lugar más cercano a la pavimentadora. En la Figura 19-5 se muestra una capa de pavimento que se ha desplazado bajo la acción del tráfico.

El agrietamiento, ilustrado en la Figura 19-6, muestra el desplazamiento de la mezcla tanto en dirección vertical como transversal. El ahuellamiento se produce cuando el tráfico pesado pasa sobre una mezcla inestable. En algunos casos, el ahuellamiento es puramente vertical (ahuellamiento de consolidación). En esta situación, la mezcla no fue compactada adecuadamente en el momento de la construcción, y las cargas de tráfico están esencialmente terminando el proceso de compactación. La forma más común de formación de roderas es la distorsión transversal - la mezcla se deforma o empuja transversalmente como resultado del flujo lateral de la mezcla bajo las cargas de tráfico aplicadas.

FIGURA 19-5 Desplazamiento debido a una mezcla insatisfactoria.

Causas

El desplazamiento y ahuellamiento se deben principalmente a una mezcla de MAC inestable (véase el apartado 3). Esta inestabilidad puede ser causada por las mismas variables que son responsables de la fisuración - un exceso de fluidos (ligante asfáltico o humedad) en la mezcla, una joroba en la curva de clasificación del árido fino, o las propiedades del árido y del cemento asfáltico. Una mezcla que tenga una alta estabilidad Marshall o Hveem puede distorsionarse longitudinalmente bajo el equipo de compactación y, posteriormente, tanto longitudinal como transversalmente bajo el tráfico. El desplazamiento y el ahuellamiento pueden ser muy frecuentes cuando una mezcla de arena se coloca en una capa gruesa [más de 40 mm (1 $^{1}/_{2}$pulg.)] a una temperatura elevada [más de 140°C (280°F)]. Además, las capas más gruesas en proporción al tamaño máximo del árido utilizado en la mezcla tenderán a empujar más que las capas más finas con el mismo tamaño y clasificación del árido.

Un funcionamiento impropio del rodillo, en particular su inversión repentina, también puede contribuir al empuje de la mezcla durante la construcción (véase el apartado 18). Si un rodillo vibratorio funciona a una velocidad demasiado alta y la separación entre impactos es demasiado grande, la capa puede desarrollar un efecto de tabla de lavar, en el que la distancia entre picos es equivalente a la separación entre impactos. El “efecto de lavado/washboarding” o “desplazamiento/corrimiento” es más probable que se produzca a frecuencias normales, pero a altas velocidades, donde la fuerza de impacto es mayor. Si se utiliza un rodillo neumático con alta presión en los neumáticos para la compactación de la avería, una mezcla tierna puede empujar lateralmente bajo los neumáticos. El desplazamiento puede ocurrir bajo cualquier rodillo que se opere incorrectamente. Otra posible causa del empuje es un exceso de material de adherencia que puede introducirse en la mezcla. Del mismo modo, el exceso de asfalto de una superficie subyacente exudante o de material de relleno de juntas

FIGURA 19-6 Ahuellamiento de una mezcla asfáltica inestable.

puede introducirse en la mezcla y aumentar su fluidez y blandura. El desplazamiento también puede ocurrir cuando la superficie subyacente está sucia o polvorienta - un fallo de deslizamiento. (Véase el apartado 14.)

Soluciones

La solución para una mezcla que desplaza bajo el equipo de compactación es aumentar su estabilidad interna. Esto puede lograrse reduciendo el contenido de fluidos (asfalto o humedad, o ambos) de la mezcla, pero sólo después de determinar el efecto de un cambio en el contenido de ligante asfáltico sobre las propiedades mecánicas de la mezcla. La fricción interna puede aumentarse reduciendo la temperatura de la mezcla. Alternativamente, la fricción interna entre las partículas de los áridos puede aumentarse cambiando la gradación de los áridos o aumentando la cantidad de partículas angulares (trituradas) en la mezcla.

El proceso de compactación de una mezcla de licitación debe modificarse, como se ha comentado anteriormente en el apartado de comprobación, para obtener una densidad suficiente en el momento de la construcción. Un aumento de la densidad conseguida durante el proceso de construcción reducirá, por lo general, la cantidad de deslizamientos y ahuellamiento que pueden producirse posteriormente bajo el tráfico aplicado. Las mezclas de arena, debido a su inherente naturaleza blanda, deben colocarse en varias capas finas en lugar de una capa gruesa cuando se utilicen como capa base o capa intermedia.

El equipo de compactación debe funcionar correctamente para reducir la posibilidad de desplazamiento de la mezcla durante la operación de rodadura. Además, si la superficie del pavimento subyacente está sucia, deberá limpiarse y aplicarse una capa de adherencia adecuada.

Efectos sobre el rendimiento

Las mezclas que tienden a desplazarse bajo el equipo de compactación son básicamente inestables. Estas mezclas normalmente continuarán deformándose bajo el tráfico, tanto longitudinal como lateralmente. El desplazo de la mezcla de MAC durante la construcción es una fuerte indicación de que el pavimento se ahuellará más tarde y no se comportará adecuadamente bajo el tráfico.

EXUDACIÓN Y MANCHAS DE GRASA

Descripción

La exudación de una mezcla asfáltica (véase la Figura 19-7) se produce cuando el cemento asfáltico fluye hacia la parte superior de la superficie de la mezcla bajo la acción de la carga del tráfico. La exudación se ve a menudo como dos rayas longitudinales al ras en las

FIGURA 19-7 Exudación del asfalto en el carril de circulación.

huellas de las ruedas de la calzada. Las manchas de grasa en una mezcla asfáltica (Figura 19-8) son zonas aisladas en las que el cemento asfáltico ha llegado a la superficie de la mezcla durante la operación de extendido y compactación o posteriormente bajo la acción del tráfico. Estas manchas pueden aparecer de forma errática e irregular, o pueden ser numerosas y seguir un patrón bastante regular.

Causas

Las manchas de grasa están causadas principalmente por un exceso de humedad en la mezcla (ver Sección 3). El problema es más común en las mezclas que contienen un alto porcentaje de árido fino (mezclas sobre arenadas) y en las que contienen áridos con una alta porosidad. Si no se elimina toda la humedad de los áridos gruesos y finos durante la operación de secado y mezclado en la planta de asfalto, el vapor de humedad forzará al cemento asfáltico a salir a la superficie de la mezcla por detrás de la pavimentadora a medida que la humedad escape de la mezcla y se evapore. Las manchas/spots de grasa se producen con mayor frecuencia cuando los acopios de áridos están húmedos o cuando el contenido de humedad varía en diferentes partes de los acopios.

FIGURA 19-8 Mancha de grasa causada por un exceso de asfalto localizado.

Las manchas de grasa a veces ocurren en áreas donde productos derivados del petróleo, tales como aceite y combustible Diesel, fueron derramados sobre la superficie del pavimento antes de la sobre carpeta (ver Figura 19-9; ver también Sección 14) o han contaminado la mezcla. Además, las manchas de grasa pueden estar asociadas con áreas segregadas en la mezcla. Si la mezcla depositada en la calzada por la pavimentadora está segregada, las zonas en las que hay un exceso de cemento asfáltico en la mezcla puede dar lugar a material ligante libre en la parte superior de la capa que se está colocando.

Las causas de la exudación se dividen normalmente en dos categorías. La primera es un exceso de fluidos en la mezcla asfáltica - ya sea cemento asfáltico, humedad o ambos. En condiciones de tráfico, la humedad y el cemento asfáltico sobrantes serán arrastrados a la superficie por el paso de los neumáticos de los vehículos. Este fenómeno de exudación suele producirse en mezclas nuevas y cuando hace calor, cuando la viscosidad del cemento asfáltico está en su nivel más bajo. Típicamente, la exudación se produce poco después de que el tráfico circule sobre la mezcla fresca - cuando todavía hay algo de humedad en la mezcla y la viscosidad del ligante de cemento asfáltico es relativamente baja.

La exudación también puede estar asociado a la falta de espacio adecuado en la mezcla para el cemento asfáltico. Si el contenido de VMA y el contenido de aire de la mezcla no proporcionan suficiente espacio para el material ligante, puede producirse exudación cuando el tráfico densifica la mezcla, tanto poco después de la construcción como posteriormente. El proceso de compactación del tráfico reducirá el contenido de aire de la mezcla y puede, a su vez, expulsar parte del cemento asfáltico de la mezcla. El asfalto “extra” aparecerá como una raya longitudinal o una mancha de grasa a lo largo de cada calzada.

FIGURA 19-9 Mancha de grasa causada por un vertido de fuel antes de la construcción del recubrimiento.

Otra posible causa de sangrado es el estado de la capa de pavimento sobre la que se coloca la nueva mezcla. Si la capa subyacente tiene exceso de asfalto en su superficie o exceso de material de sellado de grietas en las fisuras y juntas, parte de este material puede ser arrastrado a través de una capa delgada de nueva mezcla. Además, si se aplica demasiada capa de adherencia a la capa de pavimento original, el exceso de material puede ser arrastrado a través de una capa de recubrimiento fina y contribuir al problema de exudación.

Soluciones

Las variaciones en la temperatura de la mezcla asfáltica detrás de la pavimentadora indican que el contenido de humedad de la mezcla también puede ser variable. Cuando la humedad se ha evaporado, la temperatura es más baja. Este último fenómeno puede contribuir tanto al sangrado de la mezcla más tarde bajo el tráfico como a la generación de manchas de grasa en la mezcla durante la construcción. Por lo tanto, es importante que el árido utilizado en la mezcla esté relativamente seco y que el contenido de humedad de la mezcla a la salida de la planta asfáltica sea lo más bajo posible, pero no superior al 0,5%. Hay que tener especial cuidado en el secado cuando se producen mezclas que incorporan áridos muy absorbentes.

Los problemas de sangrado causados por un exceso de cemento asfáltico en la mezcla pueden resolverse más fácilmente reduciendo el contenido de asfalto, en consonancia con otras propiedades de la mezcla, como los vacíos de aire, la VMA y la resistencia o estabilidad. Sin embargo, los problemas de sangrado que se producen junto con el ahuellamiento del pavimento normalmente sólo pueden resolverse mediante un rediseño completo de la mezcla asfáltica, haciendo hincapié en el contenido adecuado de vacíos de aire y en los criterios de VMA.

Efectos sobre el rendimiento

Los puntos de grasa ocasionales en la mezcla no deberían afectar a la durabilidad final del pavimento en un grado significativo. Sin embargo, un gran número de puntos de grasa o exudación en los surcos de las ruedas sí afecta al rendimiento del pavimento, debido al contenido variable de asfalto y de huecos de aire en diferentes partes de la mezcla. Además, otros problemas de la mezcla, como el deplaze, la formación de ahuellamientos y la pérdida de resistencia al deslizamiento, pueden producirse en una mezcla que contenga muchas zonas de grasa o exudación en los surcos de las ruedas. El diseño de la mezcla asfáltica, el funcionamiento de la planta de asfalto (eliminación más completa de la humedad), o ambos, deben comprobarse para asegurar que la mezcla producida proporcionará un

comportamiento adecuado del pavimento bajo carga vehicular.

MARCAS DE RODILLO

Descripción

Durante el proceso de compactación - tanto si se utilizan rodillos vibratorios estáticos de ruedas de acero como rodillos neumáticos de neumáticos - se dejan pliegues o marcas longitudinales en la superficie de la mezcla. Una vez que la mezcla se ha enfriado a una temperatura comprendida entre 70°C y 60°C (160°F y 140°F), el rodillo de acabado suele eliminar estas marcas. Las marcas del rodillo son hendiduras que permanecen en la superficie de la mezcla una vez finalizada la laminación (véase la Figura 19-10).

También pueden existir marcas de rodillo en la superficie asfáltica cuando cualquier rodillo se estaciona sobre la estera caliente durante un período de tiempo o cuando se hace vibrar un rodillo vibratorio en su lugar. Especialmente cuando se utilizan en la posición de avería, los rodillos neumáticos pueden dejar marcas longitudinales visibles que todavía se pueden ver después de que el rodillo de acabado haya sido completado. Las marcas de la tabla de lavar vibratoria pueden ser visibles si ese rodillo se opera a una amplitud, ajuste de frecuencia o velocidad vibratoria inadecuados, como se muestra en la Figura 19-11.

Causas

Las marcas del rodillo pueden ser una indicación de que no se ha realizado el número adecuado de pasadas del rodillo sobre la mezcla (véase el apartado 18). Si el proceso de compactación se detiene antes de que se haya completado la cantidad requerida de rodillo o si la mezcla se enfría antes de que el proceso de compactación haya finalizado, las marcas longitudinales o pliegues realizados por el proceso de rodillo permanecerán en la superficie de la mezcla.

FIGURA 19-10 Marcas de rodillo en pavimento asfáltico recién colocado.

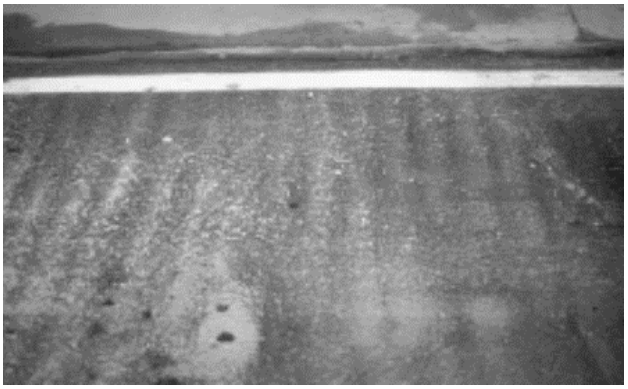


FIGURA 19-11 Marcas dejadas por un rodillo vibratorio mal accionado.

Las marcas dejadas por el rodillo en una capa de asfalto también pueden indicar una mezcla blanda (ver Sección 3). Normalmente, el operador del rodillo no podrá eliminar todas las marcas dejadas por el equipo de compactación si la mezcla es blanda o inestable. Una mezcla blanda normalmente no soportará el peso del rodillo de acabado hasta que se haya enfriado hasta el punto en que la viscosidad del cemento asfáltico haya aumentado lo suficiente como para endurecer la mezcla. Sin embargo, cuando la temperatura de la mezcla ha descendido hasta este punto, generalmente ya no se puede alcanzar el nivel de densidad requerido porque la mezcla ha perdido su trabajabilidad.

Por esta razón, las marcas o hendiduras dejadas por el rodillo durante las pasadas intermedias y de descomposición no pueden eliminarse durante el proceso de rodadura de acabado. Todas las propiedades del cemento asfáltico, los áridos y la mezcla que contribuyen a la formación de una mezcla tierna, como se ha comentado anteriormente, también contribuyen a la incapacidad del rodillo de acabado para eliminar las marcas del rodillo.

Solución

Si la causa de las marcas de los rodillos es una compactación inadecuada, deberán realizarse pasadas adicionales con los rodillos de compactación inicial, intermedios o de acabado para densificar adecuadamente la mezcla. Las soluciones para la compactación inadecuada relacionada con deficiencias en el diseño de la mezcla implican cambios en el diseño de la mezcla y en la producción de la mezcla en la planta de asfalto. La calidad y el contenido del cemento asfáltico, las propiedades y características de los áridos y la temperatura de la mezcla desempeñan un papel importante en la trabajabilidad y estabilidad del material asfáltico bajo el equipo de compactación.

Normalmente, las marcas de rodillo no pueden eliminarse de una mezcla blanda hasta que la temperatura de la mezcla haya descendido a un nivel

relativamente bajo - usualmente inferior a 70°C (160°F). A veces es posible, dependiendo de las condiciones ambientales y de las propiedades de la mezcla, eliminar las marcas de rodillo dejadas en la mezcla utilizando un compactador de neumáticos. Si la superficie de la mezcla está suficientemente caliente [60°C (140°F) o más], se pueden realizar varias pasadas con un rodillo neumático para "planchar" la superficie del pavimento. Por último, la rugosidad o la erosión causada por el funcionamiento incorrecto de un rodillo vibratorio debe eliminarse mediante el uso de técnicas de funcionamiento adecuadas con este equipo.

Efectos sobre el rendimiento

Las marcas de rodillo son normalmente una indicación de que no se ha alcanzado el nivel adecuado de compactación. En términos de durabilidad final del pavimento, el contenido de vacíos de aire o densidad de la mezcla es la característica más importante que gobierna el comportamiento de la mezcla asfáltica bajo tráfico. Si el contenido de aire vacío de una mezcla densamente graduada es alto - la densidad es demasiado baja - el pavimento generalmente no se comportará bien bajo tráfico.

SEGREGACIÓN

Descripción

La segregación es la separación del árido grueso del resto de la mezcla en una mezcla de MAC. La segregación es el resultado de una mala manipulación de la mezcla en cualquiera de los puntos durante las operaciones de producción, transporte y colocación de la mezcla. Cuando se produce segregación en un proyecto de pavimentación, es probable que se produzcan formas de deterioro del pavimento a largo plazo, como superficies onduladas y compactación deficiente. Puede producirse en el momento en que la mezcla se entrega desde la planta de asfalto a un silo de sobretensión, en el momento en que la mezcla se deposita en el camión de transporte desde el silo y en el momento en que la mezcla se descarga desde el camión a la tolva de la pavimentadora. La segregación evidente detrás de la regla de pavimentación suele adoptar una de estas tres formas: puede consistir en zonas de árido grueso (bolsas de roca) que se producen aleatoriamente a lo largo y ancho de la capa; puede producirse en una ubicación transversal a lo ancho del carril (segregación de camión a camión); o puede producirse a lo largo de un lado del ancho de la pavimentadora (segregación longitudinal o de lado a lado).

Causas

La causa de la segregación detrás de la pavimentadora está directamente relacionada con el tipo de segregación de que se trate. Las bolsas de rocas suelen estar causadas por una manipulación inadecuada del árido en los acopios, los silos de alimentación en frío o el almacenamiento de la MAC en la planta de asfalto (véase el apartado 6). Rara vez se producen cuando se utiliza una planta discontinua para producir la mezcla (sin silo), porque las cribas y los silos calientes de la planta recombinan cualquier material segregado antes de que se introduzca en la mezcladora (véase el apartado 8). Además, la mezcladora mezcla todos los áridos y normalmente elimina cualquier segregación que pudiera haberse producido previamente. Sin embargo, si se utiliza un silo en una planta discontinua, la mezcla puede segregarse por todas las mismas razones que afectan a una mezcla producida en una planta de mezcla de tambor y pasada por un silo de sobretensión o de almacenamiento (véase la Sección 11).

Las bolsas de roca y la segregación aleatoria se encuentran ocasionalmente en la calzada cuando la mezcla se ha fabricado en una planta de mezcla de tambor (véanse los apartados 9 y 10). Si el operador de la pala cargadora coloca un cubo lleno de árido segregado en una tolva de alimentación en frío, ese material puede pasar por el tambor, el silo de sobrecarga, el camión de transporte y la pavimentadora sin mezclarse completamente con el resto del árido. Esto se debe a que la planta de mezcla en tambor funciona con un flujo continuo en lugar de por lotes. Si el árido de los silos de alimentación en frío está segregado, ese material aparecerá en la calzada de forma aleatoria tanto transversal como longitudinalmente.

Algunas mezclas son más propensas a la segregación que otras (ver Sección 3). Las mezclas asfálticas que tienen un árido grueso de tamaño máximo grande [25 mm (1 pulg.) o más], tienen un bajo contenido de cemento asfáltico o están clasificadas por espacios tenderán a segregarse más fácilmente cuando se manipulen que una mezcla de clasificación densa que contenga un contenido óptimo de asfalto y un árido grueso de tamaño máximo más pequeño.

La segregación que se produce en un lado de la pavimentadora (segregación de lado a lado) cuando se utiliza una planta discontinua sin silo para producir la mezcla se debe normalmente a una carga incorrecta del camión de transporte desde la fábrica de aglomerado (véase la Sección 11). Si la mezcla no se carga en el centro del ancho de la plataforma del camión, las partículas de árido grueso de la mezcla pueden rodar hacia un lado del camión y acumularse a lo largo de ese lado. Cuando la mezcla se entrega a la tolva de la pavimentadora, la mezcla segregada se colocará en la calzada a lo largo del mismo lado, y la segregación aparecerá como una raya longitudinal en un solo lado de la pavimentadora.

La segregación que se produce en un lado de la pavimentadora cuando se utiliza una planta discontinua con silo o una planta de mezcla de tambor para producir

la mezcla suele estar causada por una carga incorrecta de la mezcla en el silo de compensación (véase la Sección 11). A medida que la mezcla se deposita en el silo desde el dispositivo de transporte (transportadores de tablillas, cinta transportadora o elevador de cangilones), la mezcla se arroja hacia un lado del silo, y las partículas de árido grueso se separan de los materiales más finos.

Cuando se vacía el silo, el árido grueso se deposita en un solo lado del camión. Este material segregado pasa entonces a través de la pavimentadora y se ve en un lado de la mezcla después de la colocación. Además, al igual que en una planta discontinua, si el camión no se carga en el centro de su ancho bajo el silo, puede producirse el rodamiento de las partículas de árido grueso, y entonces aparecerá segregación longitudinal en un lado de la nueva capa.

La segregación entre camiones tiene muchas causas potenciales (véase el apartado 11). La más común es la carga incorrecta del camión desde el silo. Si la mezcla se coloca en la plataforma del camión de una sola vez desde el silo, las partículas de árido grueso de la mezcla tienden a rodar tanto hacia la parte delantera de la plataforma como hacia el portón trasero. Este desplazamiento del árido grueso se agrava si el operario de la planta abre y cierra continuamente las compuertas del silo cerca del final del procedimiento de carga del camión para asegurarse de que se coloca todo el peso de la mezcla en el camión.

Algunos creen que la segregación de camión a camión también puede deberse a una descarga inadecuada de la mezcla en el silo. Se dice que la mezcla goteada en el silo desde el dispositivo de transporte es susceptible de segregación dentro del silo. Incluso si esto ocurre, la mezcla que se segregue en el silo aparecerá sólo como bolsas de roca aleatorias en la capa detrás de la pavimentadora, en lugar de forma sistemática entre las cargas de camión de mezcla entregadas a la pavimentadora. Por lo tanto, es dudoso que cualquier segregación de la mezcla que se produzca durante el proceso continuo de carga del silo aparezca en la calzada en un patrón discontinuo - sólo al principio o al final, o ambos, de un camión cargado de mezcla.

La segregación por temperatura de la mezcla también ha demostrado ser un problema. La mezcla se enfría más rápidamente cerca del borde, la parte inferior y la parte superior del camión durante el transporte. Este material más frío no siempre se vuelve a mezclar con el MAC más caliente, lo que provoca una segregación por temperatura durante la operación de extendido. El resultado puede ser una mayor variabilidad en la densidad durante la construcción y una superficie no uniforme. Este problema puede controlarse mediante tecnología de infrarrojos.

Solución

La solución a cada tipo de segregación está relacionada con su causa. En el caso de bolsas de roca aleatorias que aparecen de forma intermitente en la capa, debe comprobarse el método de acopio de áridos gruesos en la planta de asfalto y la carga de ese material en los depósitos de alimentación en frío mediante el cargador frontal para asegurarse de que se utilizan técnicas adecuadas de manipulación de áridos. Además, deberán inspeccionarse todos los puntos del sistema de producción de la mezcla en los que puedan acumularse partículas de árido grueso para determinar si el flujo de las piezas de árido grueso y fino es desigual. Debe utilizarse un dosificador en la parte superior del silo para dirigir la mezcla hacia el centro de ese equipo.

Para la segregación longitudinal (de lado a lado), la carga del camión de acarreo desde el molino de bolas de la planta de procesamiento por lotes o desde el silo, ya sea en la planta de procesamiento por lotes o de mezcla en tambor, debe supervisarse para garantizar que la mezcla se entrega en el centro del ancho del vehículo. Cuando se utilice una planta de mezcla en tambor para fabricar la mezcla y la segregación aparezca siempre en un lado de la pavimentadora, deberán cargarse varios camiones en el silo mirando en dirección contraria a su procedimiento normal de carga. Cuando la mezcla pasa por la pavimentadora, la segregación longitudinal debe cambiar de lado: pasar de un lado del carril de la pavimentadora al otro. Si la posición transversal de la segregación longitudinal cambia (y debería hacerlo), la solución al problema de la segregación lateral debe tener lugar en la parte superior del silo. La mezcla depositada en el silo desde el dispositivo de transporte debe dirigirse hacia el centro del silo en lugar de hacia un lado, de modo que las partículas de árido grueso de la mezcla no sean lanzadas hacia un solo lado del silo. Esta solución requiere algunos cambios en la configuración del equipo en la parte superior del silo. Si la posición transversal de la segregación longitudinal no cambia, es probable que la segregación se deba a un problema de la pavimentadora.

La mayor parte de la segregación de camión a camión puede reducirse significativamente utilizando varias descargas de mezcla para cargar los camiones de transporte. Si se carga un camión de eje tándem, se deben realizar al menos tres descargas diferentes de mezcla - en la parte delantera del camión, cerca del cabezal delantero, en la parte trasera del camión, cerca del portón trasero, y en el centro de la plataforma del camión, entre la primera y la segunda descarga. Si se utiliza un camión más grande, se deben realizar más descargas de mezcla -kl la primera en la parte delantera de la caja del camión y la segunda cerca del portón trasero. Una de las principales soluciones para la segregación de camión a camión es minimizar la distancia que las partículas de árido grueso pueden rodar. Esto se consigue haciendo varias descargas de mezcla en el camión.

Se debe prohibir al operador de la planta que rellene la carga de mezcla al final del proceso de carga. Cada vez que se abran las compuertas del silo y se vierta un poco de mezcla en el camión, las partículas de árido grueso tenderán a separarse del material más fino. Este problema sólo puede eliminarse evitando que se produzca.

Si la segregación se produce durante la carga del camión y hay una acumulación de partículas de áridos gruesos en la compuerta trasera del camión, en la parte delantera de la plataforma, o en ambas, la cantidad de segregación que aparece en la calzada puede reducirse normalmente descargando adecuadamente el camión en la pavimentadora.

En primer lugar, la plataforma del camión debe elevarse un poco antes de abrir el portón trasero para que la mezcla pueda desplazarse por la plataforma y deslizarse contra el portón trasero. Este procedimiento rodea cualquier partícula gruesa que haya rodado hasta la zona del portón trasero con mezcla no segregada. En lugar de depositar primero sólo el árido grueso en la tolva de la pavimentadora, se descarga una masa de mezcla cuando se abre la compuerta trasera del camión, inundando la tolva con mezcla e incorporando normalmente el árido grueso segregado a esa masa de mezcla MAC.

El funcionamiento de la pavimentadora también puede aumentar o reducir la cantidad de segregación que se produce detrás de la regla. Si la tolva de la pavimentadora se vacía de mezcla, si los transportadores de listones están a la vista y si las alas de la tolva se vuelcan después de cada camión cargado de mezcla, cualquier partícula de árido grueso que se haya acumulado en la compuerta trasera del siguiente camión cargado de mezcla se depositará en el fondo de la tolva y, a continuación, se transportará directamente de vuelta a la cámara vacía del sinfín delante de la regla. Este material segregado aparecerá detrás de la regla en cuanto la pavimentadora avance. Por lo tanto, esta segregación transversal no se produce realmente al final de la carga del camión, sino al principio de la siguiente carga de mezcla.

La segregación puede reducirse manteniendo la tolva llena de mezcla entre cargas de camión. La masa de mezcla que inunda la tolva desde el camión de transporte se mezclará con la mezcla que ya se encuentra en la tolva de la pavimentadora. Cualquier material segregado se incorporará a la mezcla que los transportadores de listones arrastran de vuelta a los sinfines y pasa por debajo de la regla pavimentadora. La cantidad de segregación de camión a camión puede reducirse significativamente, aunque no siempre eliminarse por completo, mediante buenas técnicas de operación de la pavimentadora. En realidad, el problema debería resolverse durante el procedimiento de carga de camiones.

El uso de MTV también ha demostrado ser beneficioso para reducir la segregación. La MTV remezcla la MAC, lo que reduce la segregación de los áridos, así como las temperaturas diferenciales dentro de la mezcla (también conocida como segregación por temperatura).

Efectos sobre el rendimiento

La segregación puede afectar directamente a la durabilidad del pavimento al aumentar el contenido de huecos de aire de la mezcla en las zonas segregadas e incrementar el potencial de daños por humedad. Además, los lugares segregados son muy susceptibles al desprendimiento de agregados y, si es suficientemente grave, a la desintegración total bajo el tráfico. La segregación, ya sea en forma de bolsas de roca, segregación longitudinal (de lado a lado) o segregación transversal (de camión a camión), es extremadamente perjudicial para el rendimiento a largo plazo del pavimento.

COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA POBRE

Descripción

La mezcla de MAC debe ser compactada de manera que los vacíos de aire en el lugar estén a un nivel aceptable. Si los vacíos de aire están por encima de 7 a 8 por ciento, la mezcla será permeable al aire y al agua y no tendrá la durabilidad requerida. Si la compactación inicial da como resultado unas cámaras de aire de aproximadamente el 4% o inferiores, la mezcla puede volverse inestable bajo el tráfico después de una densificación adicional; el resultado será el desplazamiento y ahuellamiento en la mezcla, como se ha comentado anteriormente. La mayoría de las mezclas requieren un nivel significativo de compactación para alcanzar el deseado 7 a 8 por ciento o menos de huecos de aire.

Causas

Cuando la mezcla es demasiado rígida o demasiado blanda, la compactación es difícil. La causa principal de una compactación deficiente es una baja densidad de diseño de la mezcla (altos vacíos de aire de diseño) (véase la Sección 3). Otras causas incluyen un soporte subyacente inadecuado (Sección 14), tipo y peso inadecuados de los rodillos (Sección 18), presión inadecuada de los neumáticos en los rodillos de neumáticos de goma (Sección 18), procedimiento inadecuado de laminación (Sección 18), diseño inadecuado de la mezcla (Sección 3), segregación de la mezcla (véase más arriba), humedad en la mezcla (Sección 3), variación de la temperatura de la mezcla y baja temperatura de la mezcla.

Solución

Las soluciones a los problemas de compactación pasan por tomar las medidas necesarias para garantizar un soporte adecuado, producir una mezcla aceptable y utilizar técnicas satisfactorias de extendido y laminado. Cuando el soporte es inadecuado, los requisitos de compactación pueden tener que relajarse, o la mezcla puede tener que ser rediseñada para permitir una compactación satisfactoria.

Cuando el contenido de asfalto es demasiado alto, la mezcla puede compactarse con demasiada facilidad, con lo que los vacíos de aire son bajos (lo que provoca la formación de roderas; véase el análisis anterior). Cuando el contenido de asfalto es demasiado bajo, la mezcla puede ser rígida y difícil de compactar hasta alcanzar la densidad especificada. Un diseño satisfactorio de la mezcla producirá una mezcla con un contenido óptimo de asfalto que pueda compactarse con un esfuerzo razonable hasta alcanzar la densidad requerida.

Para una buena compactación son necesarias buenas técnicas de extendido y rodado, como se ha comentado anteriormente. Normalmente, la densidad puede aumentarse reduciendo la velocidad de la pavimentadora o de los rodillos. La densidad también puede aumentarse incrementando el peso y el número de rodillos. El proceso de compactación debe ajustarse para producir una densidad óptima.

Efectos sobre el rendimiento

Cuando la compactación es inadecuada (más de 7 a 8 por ciento de vacíos de aire) la mezcla será permeable al aire y al agua. El agua puede fluir a través de la HMA y reducir la resistencia de la capa base subyacente. Las cantidades altas de vacíos también dan lugar a una oxidación excesiva de la MAC, lo que conduce al desprendimiento de agregados, formación de grietas y al deterioro general de la MAC con el paso del tiempo.

Cuando los vacíos de aire son excesivamente bajos después de la compactación (menos del 4%), es probable que la mezcla se ahuelle y deslice bajo el tráfico. Las cantidades bajas de vacíos no son el resultado de una compactación excesiva, sino de una mezcla insatisfactoria.

OTROS PROBLEMAS DEL PAVIMENTO

La discusión anterior ha abordado sólo aquellos problemas que ocurren en el momento de la producción de la mezcla asfáltica, el extendido y la compactación. Una serie de otras deficiencias pueden ocurrir en una estructura de pavimento asfáltico con el tiempo y la carga de tráfico una vez que la construcción se ha completado. Estas deficiencias incluyen grietas por fatiga, ahuellamiento, deslizamientos, desprendimiento de agregados y desintegración. La discusión de estos problemas está fuera del alcance de este manual.

Glosario de Acrónimos y Abreviaciones

AASHTO: Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte

AC: cemento asfáltico

ESAL: Equivalente de carga de un solo eje de 80 kN

FHWA: Administración Federal de Carreteras

HMA: Mezcla Asfáltica en Caliente

JMF: fórmula de mezcla de trabajos

MTV: vehículo de transferencia de material

OSHA: Administración de Seguridad y Salud Ocupacional

PCC: Hormigón de cemento portland

PD: porcentaje defectuoso

PG: Grado de Desempeño

PWL: porcentaje de material dentro de los límites de especificación

QA: garantía de calidad

QC: control de calidad

RAP: pavimento de asfalto recuperado

SHRP: Programa Estratégico de Investigación de Carreteras

SMA: asfalto de matriz de piedra

SSU: Segundos Saybolt Universal

USACE: Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos

VFA: vacíos llenos de asfalto

VMA: vacíos en el agregado mineral

Bibliografía

Abd El Halim, A. O., W. Phang, and M. El Gindy. Extending the Service Life of Asphalt Pavements Through the Prevention of Construction Cracks. In Transportation Research Record 1178, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1988, pp. 1–8.

Acott, M., and R. Dunmire. Hot Mix Asphalt Construction—Field Diagnosis and Trouble-Shooting Guide. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 56, 1987, pp. 330–360.

Afferton, K. C. Achieving and Verifying Specified Compaction. Presented at the Asphalt Compaction Conference, Albany, N.Y., Dec. 1979, 28 pp.

Alexander, M. L. Cost/Benefit Evaluation of End-Result Asphalt Concrete Compaction Specifications. Report FHWA/ CA/TL-88/03. California Department of Transportation, June 1988, 56 pp.

Alexander, M. L., and R. N. Doty. California Study of Asphalt Concrete Density Measurement—Nuclear Versus Core Density. In ASTM STP 829: Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1984, pp. 80–92.

Anderson, D. A., D. R. Luhr, and C. E. Antle. NCHRP Report 332: Framework for Development of PerformanceRelated Specifications for Hot-Mix Asphaltic Concrete. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1990. Anderson, M., R. J. Cominsky, G. A. Huber, and T. W. Kennedy. The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays. SHRP-A-407. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1994, 172 pp.

Anderson, R. M., and H. U. Bahia. Evaluation and Selection of Aggregate Gradations for Asphalt Mixtures Using Superpave. In Transportation Research Record 1583, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1997, pp. 91–97.

Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation. Manual Series No. 17 (MS-17). Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1983, 164 pp.

Asphalt Paving Manual. Manual Series No. 8 (MS-8). Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1978, 148 pp.

Baker, R. F., J. R. Croteau, J. J. Quinn, and E. J. Hellriegel. Longitudinal Wedge Joint Study. In Transportation Research Record 1282, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1990, pp. 18–26.

Basha, M. A. Bituminous Paving Operations. Utah Department of Transportation, April 1979, 114 pp.

Bell, C. A., R. G. Hicks, and J. E. Wilson. Effect of Percent Compaction on Asphalt Mixture Life. In ASTM STP 829: Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1984, pp. 107–130.

Bernard, D. W., and M. T. Grainer. Longitudinal Joint Construction in Asphalt Concrete Pavement. Technical Report 91-1. New York State Department of Transportation, 1991, 23 pp.

Bissada, A. F. Compactibility of Asphalt Paving Mixtures and Relation to Permanent Deformation. In Transportation Research Record 911, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1983, pp. 1–10.

Bissada, A. F. Resistance to Compaction of Asphalt Paving Mixtures and Its Relationship to Stiffness. In ASTM STP 829: Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1984, pp. 131–144.

Bituminous Mix Design and Field Control. Technical Advisory T 5040.24. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Aug. 1985, 23 pp.

Bjorklund, N. A. Pavement Deformation and Resistance to Fatigue of Resurfaced Pavements. A Laboratory Investigation Performed on Beams Taken Across the Wheelpath and Resurfaced in the Laboratory. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 54, 1985, pp. 551–568.

Brock, J. D. Pavement Smoothness. Technical Bulletin T-112. Astec Industries, Inc., 1984, 17 pp.

Brock, J. D. Segregation of Asphalt Mixtures. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 55, 1986, pp. 269–277.

Brock, J. D., and L. Wagner. Trucking, Our Out of Control Cost. Bulletin T-118. Astec Industries, Inc., 1988, 29 pp.

Brown, E. R. Experiences of Corps of Engineers in Compaction of Hot Asphalt Mixtures. In ASTM STP 829: Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1984, pp. 67–79.

Brown, E. R., and M. S. Buchanan. NCHRP Research Results Digest 237: Superpave Gyratory Compaction Guidelines. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., March 1999, 5 pp.

Brown, E. R., S. Buchanan, M. Huner, and R. B. Mallick. An Evaluation of Superpave Gyratory Compaction of HotMix Asphalt. NCAT Report 98-5. National Center for Asphalt Technology, Auburn, Ala., 1998, 24 pp.

Brown, E. R., P. S. Kandhal, T. W. Kennedy, D.-Y. Lee, and F. L. Roberts. Hot-Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, 2nd ed. National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, Lanham, Md., 1996, 603 pp.

Brown, E. R., and J. E. Shoenberger. Experiences of Corps of Engineers in Compaction of Hot Asphalt Mixtures. Proc., 20th Paving and Transportation Conference, University of New Mexico, Dec. 1983, pp. 96–108.

Brush, G. G. How to Choose the Proper Sample Size. Vol. 12 in The ASQC Basic References in Quality Control, American Society for Quality Control, Milwaukee, Wis., 1988. Bulger, S. A., P. Korgemagi, and D. F. Lynch. An Evaluation of a Triple-Jointed Screed Paver as a Solution to Pavement Rutting. Ontario Ministry of Transportation, Jan. 1987, 21+ pp.

Bulger, S. A., P. Korgemagi, and D. F. Lynch. An Evaluation of a Rubber-Coated Steel Drum Vibratory Roller. Ontario Ministry of Transportation, Jan. 1987, 20+ pp.

Burnett, W. C., J. J. Thomas, and W. C. Dixon. Density Studies of Asphalt Concrete. Physical Research Report 65-6. New York State Department of Public Works, June 1965, 26 pp.

Campanella, J. Principles of Quality Costs. American Society for Quality Control, Milwaukee, Wis., 1990.

Cechetini, J. A. Vibratory Compaction of Asphalt Concrete Pavements. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 43, 1974, pp. 384–408.

Chu, T. Y. A Study for Improving the Durability of Plant-Mix Asphalt Surfaces in South Carolina. Research Project 525. University of South Carolina College of Engineering, Feb. 1979, 132 pp.

Cominsky, R. J., B. M. Killingsworth, R. M. Anderson, D. A. Anderson, and W. W. Crockford. NCHRP Report 409: Quality Control and Acceptance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1998, 215 pp.

Compacting Asphalt with a Dynapac Vibratory Tandem Roller. Dynapac Mfg., Inc., Oct. 1978, 40 pp.

Compaction Handbook. Hyster Co., May 1978, 127 pp.

Corlew, J. S., and P. F. Dickson. Cold-Weather Paving of Thin Lifts of Hot-Mixed Asphalt on Preheated Asphalt Base. In Highway Research Record 385, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1972, pp. 1–6.

Cosbey, H. Asphalt Compaction by Vibratory Roller. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, 1977, pp. 279–293.

Cowden, R. H. Update: A Study of Modern Vibratory Asphalt Compaction and Its Benefits.

Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, Vol. 23, Nov. 1978, pp. 232–252.

Crawford, C. Tender Mixes. QIP 108. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., March 1986, 9 pp.

Crawford, C., and J. A. Scherocman. Hot Mix Asphalt Joint Construction. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., 1990, 12 pp.

Daines, M. E. Cooling of Bituminous Layers and Time Available for Their Compaction. Research Report 4. Transport and Road Research Laboratory, 1985, 11 pp. Decker, D. Handling RAP in an HMA Facility. Roads and Bridges, Vol. 37, March 1999, pp. 52–54.

Dellert, R. B. Vibratory Compaction of Thin Lift Asphalt Resurfacing. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, 1977, pp. 287–293.

Design of Hot Asphalt Mixtures. Educational Series No. 3 (ES-3). Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1986, 8 pp.

Dickson, P. F., and J. S. Corlew. Cooling of Hot-Mix Asphalt Laid on Frozen Subgrade. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 41, 1972, pp. 49–65.

Duncan, G. R., T. D. White, and R. C. Williams. Sources, Measurement, and Effects of Segregated Hot Mix Asphalt Pavement. FHWA/IN/JHRP-96/16. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 1996, 316 pp.

Epps, J. A., and F. N. Finn. Asphalt Concrete: Methods for Specifying In-Place Density. Presented at the Texas Hot Mix Asphalt Pavement Association Annual Meeting, Oct. 1982, pp. 59–89.

Epps, J. A., B. M. Gallaway, and W. W. Scott, Jr. Long-Term Compaction of Asphalt Concrete Pavements. In Highway Research Record 313, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1970, pp. 79–91.

Epps, J. A., B. M. Gallaway, W. J. Harper, W. W. Scott, and J. W. Seay. Compaction of Asphalt Concrete Pavements. Research Report 90-2F. Texas A&M University, July 1969, 147 pp.

Estimating Net Average Speeds for Pavers and Roller. Dynapac Mfg., Inc., Sept. 1978, 56 pp.

Factors Affecting Compaction. Educational Series No. 9 (ES-9). Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1980, 12 pp.

Fee, F. Evaluation of the In-Place Density of Bituminous Paving Air Void Method vs % Compaction. Proc., Federal Aviation Administration Airport Conference, March 1983, 5+ pp. Finn, F. N., and J. A. Epps. Compaction of Hot Asphalt Concrete. Research Report 214-21. Texas A&M University, Aug. 1980, 35 pp.

Fisher, D. R. A General Overview of Asphalt Roadway Construction. Ingersoll-Rand Construction Co., 1983, 42 pp.

Flexible Pavement Density: Three Studies. Research Report 6. New York State Department of Transpor98-1. National Center for Asphalt Technology, Auburn, Ala., 1998, 22 pp.

Foo, K. Y., P. S. Kandhal, and R. B. Mallick. A Critical Review of VMA Requirements in Superpave. NCAT Report 98-1. National Center for Asphalt Technology, Auburn, Ala., 1998, 22 pp

Foster, C. R. A Study of Cessation Requirements for Constructing Hot-Mix Asphalt Pavements. In Highway Research Record 316, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1970, pp. 70–75.

Foster, C. R. Pavement Smoothness. Information Series 53. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., n.d., 7 pp.

Foster, C. R. The Effect of Distance of Haul and Traffic Restrictions on the Cost of Asphalt Pavement. Information Series 79. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., June 1981, 6 pp.

Foster, C. R. The Effect of Paver Speed on Roller Requirements. In Highway Research Record 316, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1970, pp. 76–81.

Foster, C. R. The Effect of Weight of Steel Tired Rollers on the Unit Weight of Compacted Asphalt Paving Mixtures. Information Series 90. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., Nov. 1983, 46 pp.

Franswick, W. A., and S. B. Hudson. Quality Control for Hot Mix Plant and Paving Operations. QIP-97. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., n.d., 131+

Geller, M. Compaction Equipment for Asphalt Mixtures. In ASTM STP 829: Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1984, pp. 28–47.

Geller, M. Compaction Equipment for Asphalt Mixtures. Dynapac Research Bulletin 8030, Jan. 1983.

Geller, M. Summarizing the Development of Vibratory Roller Application for Compacting Bituminous Mixes in the USA. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, 1977, pp. 272–279.

Gessler, M. Compaction of Tender Asphalt Mixes. Dynapac Research Bulletin 8027, Nov. 1981, 8 pp.

Gibboney, W. B. Development of a Bituminous Concrete Compaction Specification. Ohio Department of Highways, April 1972, 32 pp.

Graham, M. D., W. C. Burnett, J. J. Thomas, and W. C. Dixon. Pavement Density—What Influences It. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 34, 1965, pp. 286–308.

Grant, E. L., and R. S. Leavenworth. Statistical Quality Control. McGraw-Hill, New York, 1988.

Hachiya, Y., and K. Sato. Effect of Tack Coat on Binding Characteristics at Interface Between Asphalt Concrete Layers. Proc., 8th International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 1, University of Washington, Seattle, 1997, pp. 349–362.

Handbook of Applications of Statistical Concepts to Highway Construction Industry. National Technical Information Service, Part I, 1971, pp 4.1–4.45.

Handbook of Bituminous Compactionology. American Hoist & Derrick Co., 1977, 49 pp.

Hansen, B. L. Quality Control: Theory and Application. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1963.

Hansen, K. HMA Production Facilities: Training for the Move to QC/QA. Roads and Bridges, Vol. 37, Jan. 1999, p. 40.

Harrington-Hughes, K. SGC: The Backbone of Superpave. Transportation Builder, Vol. 7, Feb. 1995, pp. 42–43.

Henrick, H. W. Modern Asphalt Compaction in Western Europe. Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, Nov. 1983, pp. 339–375.

Hot-Mix Bituminous Paving Manual. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Dec. 1984, 121 pp.

Hughes, C. S. A Density Specification with Pay Factors. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 52, 1983, pp. 357–362.

Hughes, C. S. Incentive and Disincentive Specification for Asphalt Concrete Density. In Transportation Research Record 986, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1984, pp. 38–42.

Hughes, C. S. NCHRP Synthesis of Highway Practice 152: Compaction of Asphalt Pavement. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1989, 48 pp.

Hughes, C. S. Symposium—Effect of New Equipment on Asphalt Pavement Construction: Virginia Practice. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 39, 1970, pp. 661–670.

Hunter, J. S., and O. J. Pendleton. On the Importance of Statistical Science in Transportation. In Transportation Research Record 1340, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1992, pp. 1–2.

Kandhal, P. Project Studies Longitudinal Joints. Roads and Bridges, Vol. 36, Jan. 1998, p. 18.

Kandhal, P. S. Specification for Compaction of Asphalt Pavements. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 52, 1983, pp. 362–369.

Kandhal, P. S. Superpave's Restricted Zone. Roads and Bridges, Vol. 37, May 1999, p. 20.

Kandhal, P. S. Detecting and Quantifying Segregation. Roads and Bridges, Vol. 38, Jan. 2000, p. 20.

Kandhal, P. S., and R. B. Mallick. Study of LongitudinalJoint Construction Techniques in Hot-Mix Asphalt Pavements. In Transportation Research Record 1543, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1996, pp. 106–112.

Kandhal, P. S., and R. B. Mallick. Longitudinal Joint Construction Techniques for Asphalt Pavements. Proc., 8th International Conference on Asphalt Pavements, University of Washington, Seattle, 1997, pp. 363–379.

Kandhal, P. S., and R. B. Mallick. Longitudinal Joint Construction Techniques for Asphalt Pavements. NCAT Report 97-4. National Center for Asphalt Technology, Auburn, Ala., 1997, 24 pp.

Kandhal, P. S., R. J. Cominsky, D. Maurer, and J. B. Motter. Development and Implementation of Statistically Based End-Result Specifications for Hot-Mix Asphalt in Pennsylvania. In Transportation Research Record 1389, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1993, pp. 9–16

Kandhal, P. S., and S. S. Rao. Evaluation of Longitudinal Joint Construction Techniques for Asphalt Pavements. In Transportation Research Record 1469, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1994, pp. 18–25

Kandhal, P. S., and W. C. Koehler. Pennsylvania's Experience in the Compaction of Asphalt Pavements. In ASTM STP 829: Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1984, pp. 93–106.

Kennedy, T. W., R. B. McGennis, and R. J. Holmgreen. Asphalt Mixture Segregation: Diagnostics and Remedies. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 56, 1987, pp. 304–329.

Kennedy, T. W., R. B. McGennis, and J.-N. Wang. Volumetric and Mechanical Performance Properties of Superpave Mixtures. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 12, Aug. 2000, pp. 238–244.

Kennedy, T. W., F. L. Roberts, and R. B. McGennis. Effects of Compaction Temperatures and Effect on the Engineering Properties of Asphalt Concrete Mixtures. In ASTM STP 829: Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1984, pp. 48–66.

Kennedy, T. W., F. L. Roberts, R. B. McGennis, and J. N. Anagnos. Compaction of Asphalt Mixtures and the Use of Vibratory Rollers. Research Report 317-1. Center for Transportation Research, March 1984, 44 pp.

Kilpatrick, M. J., and R. G. McQuate. Bituminous Pavement Construction. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, June 1967, 42 pp.

Kopac, P. A. Current Practices in Acceptance of Bituminous Concrete Compaction. In Transportation Research Record 986, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1984, pp. 43–46.

Korgemagi, P., and D. F. Lynch. Attacking the Problem of Segregated Hot Mix Pavements. Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, Vol. 33, Nov. 1988, pp. 76–85.

Kuennen, T. Careful Laydown Defining Element of Quality Superpave Construction. Pavement, Vol. 15, June 2000, pp. 16–20.

Layson, C. S., V. L. Schrimper, and R. B. McGennis. High Energy Screeds on Asphalt Pavers. Presented to Transportation Research Board Committee A2F02, Flexible Pavement Construction, Jan. 1986, 9 pp.

Liljedahl, B. Aids in Compacting Hot Mix Asphalt Layers. European Asphalt Pavement Association, March 1988, 6 pp.

Linden, F., and J. VanDerHeide. Some Aspects of the Compaction of Asphalt Mixes and Its Influence on Mix Properties. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 55, 1986, pp. 607–614.

Lister, N. W. Dense Graded Macadams: Improving Compaction and Performance. Asphalt Technology, No. 30, Dec. 1980, pp 44–56.

Lister, N. W., and W. D. Powell. The Compaction of Bituminous Base and Base-Course Materials and Its Relation to Pavement Performance. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 44, 1975, pp. 75–107.

Little, D. N., M. A. Rodriguez, and J. A. Scherocman. Effect of Equipment and Mix Variables on Surface Shadows in Asphalt Concrete Mats. Final report. FHWA/TX-89/1134-1F. 1990, 203 pp.

Lohshene, E. S., R. C. G. Haas, E. Meyer, and A. Chestham. Management of Construction Procedures for Asphalt Compaction. Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, Vol. 23, Nov. 1978, pp. 126–157.

Mallick, R. B., S. Buchanan, E. R. Brown, and M. Huner. Evaluation of Superpave Gyratory Compaction of Hot Mix Asphalt. In Transportation Research Record 1638, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1998, pp. 111–119.

Marker, V. Factors Affecting Compaction. IG-3. Asphalt Institute, Lexington, Ky., Nov. 1979, 27 pp.

Marker, V. Symposium—Effect of New Equipment on Asphalt Pavement Construction: Thick Lift Compaction for Asphalt Concrete Bases. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 39, 1970, pp. 658–660.

Marker, V. Symposium—Technology of Thick Lift Construction: Construction Methods. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 41, 1972, pp. 354–364.

Martenson, E. D. Innovations in Variable-Width Asphalt Paving. Technical Notes T502. Barber-Greene Co., n.d., 9 pp.

McGennis, R. B., and T. W. Kennedy. Segregation of Asphalt Mixtures: Causes, Identification, and Cures. Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, 1986, pp. 46–70.

McGennis, R. B., and R. W. Ray. Superpave for Senior Managers—Participant Manual. Report HI 98-004. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Nov. 1998, 35 pp.

McKillen, E. R. Vibratory Compaction of Asphalt Is Not Always Easy. Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, Vol. 21, Nov. 1976, pp. 249–268.

McQueen, R. D. Investigation of the Inter-Relationship Between Base Pavement Stiffness and Asphalt Overlay Compaction. DOT/FAA/ES-88-1. Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation, March 1988, 49 pp.

Minnesota Department of Transportation. Supplemental Specifications to Standard Specifications for Construction. Jan. 2, 1991.

Minor, C. E. Are Hot-Mix Tarps Effective? Information Series 77. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., March 1981, 8 p

Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other HotMix Types. Manual Series No. 2 (MS-2). Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1988, 112 pp

Monoscalco, E. F., M. Feaster, and J. R. Stephenson. Transportation, Laydown and Compaction. Proc., National Asphalt Pavement Association Annual Meeting, Jan. 1985, pp. 211–240.

Nittinger, R. J. Thick-Lift Flexible Pavement Wearing Courses. Research Report 41. New York State Department of Transportation, Feb. 1977, 21 pp.

Nittinger, R. J. Vibratory Compaction of Asphalt Concrete. In Transportation Research Record 659, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1977, pp. 46–53

Noel, R. B. Compacting Heavy Duty Highway Pavements. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, 1977, pp. 309–326.

Nunn, M. E., and D. Leech. Substitution of Bituminous Roadbase of Granular Sub-Base. Research Report 58. Transport and Road Research Laboratory, 1986, 11 pp.

Open-Graded Asphalt Friction Courses. Construction Leaflet No. 10 (CL-10). Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1974.

Palmer, R. K., and J. J. Thomas. Density Studies of Asphalt Concrete. Research Report 68-2. New York State Department of Transportation, June 1968, 40 pp.

Parker, F., Jr., E. R. Brown, and R. L. Vecellio. Development of New Criteria for Control of Hot-Mix Asphalt Construction. In Transportation Research Record 1389, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1993, pp. 1–8.

Pavement Rehabilitation—Preparation for Asphalt Overlays. Construction Leaflet No. 5 (CL-5). Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1974. Paver Operations for Quality. Information Series 59. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., Oct. 1976, 6 pp.

Paver Operations for Quality. Information Series 125. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., 1996, 24 pp.

Paving Manual. Blaw-Knox Construction Equipment, Inc., n.d., 43 pp.

Placing and Compacting Thick Lifts of Hot Mix Asphalt Pavements. Information Series 21. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., March 1986, 13 pp.

Persijn, M., and Y. Van Nuland. Relation Between Measurement System Capability and Process Capability. Quality Engineering, Vol. 9, No. 1, 1996, pp. 95–98.

Pillet, M. A Specific Process Control Chart for Small-Batch Control. Quality Engineering, Vol. 8, No. 4, 1996, pp. 581–586. Powell, W. D. Methods of Improving Compaction of Dense Coated Macadam. Asphalt Technology, No. 24, May 1978.

Powell, W. D., and D. Leech. Standards for Compaction of Dense Roadbase Macadam. Supplementary Report 717. Transport and Road Research Laboratory, 1982, 12 pp.

Powell, W. D., N. W. Lister, and D. Leech. Improved Compaction of Dense Graded Bituminous Macadams. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 50, 1981, pp. 394–411.

Precision Experiment: Percentage Refusal Density Test, The Panel's Report. Contractor Report 1. Transport and Road Research Laboratory, 1985, 14+ pp. Price, D. A. Nighttime Paving. Report CDH-DTP-R-86-6. Colorado Department of Highways, April 1989, 12 pp.

Price, D. A. Nighttime Paving. Report CDOH-DTP-R-85-2. Colorado Department of Highways, Feb. 1985, 20 pp. Principles of Construction of Hot-Mix Asphalt Pavements. Manual Series No. 22 (MS-22). Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1983, 300 pp.

Procedures for Rolling a Test Strip with a Dynapac Vibratory Roller. Dynapac Mfg., Inc., Oct. 1978, 32 pp.

Puangchit, P., R. G. Hicks, J. E. Wilson, and C. A. Bell. Development of Rational Pay Adjustment Factors for Asphalt Concrete. In Transportation Research Record 911, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1983, pp. 70–79.

Quality Assurance Through Process Control and Acceptance Sampling. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, April 1974.

Quality Control for Hot Mix Asphalt Manufacturing Facilities and Paving Operations. QIP-97. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., Sept. 1987, 57 pp.

Roberts, F. L. Importance of Compaction of Asphalt Mixtures. Presented at State-of-the-Art Conference on Improved Asphalt Pavement Performance Through Effective Compaction, Arlington, Tex., Jan. 1980, 21 pp

Roller Operations for Quality. Information Series 58. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., March 1980, 4 pp.

Rolling and Compaction of Asphalt Pavement. Report TAS-15. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., 1990, 31 pp.

Rolling and Compaction of Asphalt Pavement Instruction Manual. VA-21, Asphalt Institute; TAS-3, National Asphalt Pavement Association, n.d., 32 pp.

Santoro, R. R., K. C. Afferton, and J. A. Walz. Stanhope Study of Compaction Methods for Bituminous Stabilized Base. In Highway Research

Record 385, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1972, pp. 7–18.

Scherocman, J. A., and E. D. Martenson. Placement of Asphalt Concrete Mixtures. In ASTM STP 829: Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1984, pp. 3–27.

Scholl, L. G. Pay Adjustment System for AC Pavements (A 5-Year Evaluation). Final report. FHWA-OR-RD-92-03. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 1991, 66 pp.

Schoonover, R. D. Standard Costs for Asphalt Paving, Applications for Contract Bidding and Performance Mangement. Management Series 2. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., n.d., 14 pp

Seaman, D. J. Dynamic Testing: Density on the Run. In Transportation Research Record 1178, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1988, pp. 16–22.

Service Training Manual. Blaw-Knox Construction Equipment, Inc., n.d., 32 pp.

Shah, N. D., and P. F. Dickson. Design Consideration for a Direct-Fired Propane Heater to Preheat the Base for ColdWeather Paving. In Transportation Research Record 549, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1975, pp. 55–62.

Smith, R. A., and J. Epps. Environmental Conditions for Placing Asphalt Concrete. Research Report 214-11. Texas A&M University, Dec. 1975, 48 pp.

State of the Practice for Use of RAP in Hot-Mix Asphalt. Roads and Bridges, Vol. 37, Jan. 1999, pp. 48–50, 52, 54.

Stroup-Gardiner, M., and D. Newcomb. Statistical Evaluation of Nuclear Density Gauges Under Field Conditions. In Transportation Research Record 1178, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1988, pp. 38–46.

Superintendent's Manual on Compaction of Hot Mix Pavement. Training Aid Series 12. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., Jan. 1985, 32 pp.

Systems Analysis of Storage, Hauling, and Discharge of Hot Asphalt Paving Mixtures. QIP-94. National Asphalt Pavement Association, Lanham, Md., 1972, 154 pp.

Systems Analysis of the Production and Laydown of Hot-Mix Asphalt Pavement. Texas A&M University, n.d., 149 pp.

Task Force on Statistical Methods Advocates Quality Assurance Techniques. TR News, No. 169, Nov.–Dec. 1993, pp. 20–21.

Technology and the Asphalt Paver. Blaw-Knox Construction Equipment Co., 1983, 11 pp.

Tegeler, P. A., and B. J. Dempsey. A Method of Predicting Compaction Time for Hot-Mix Bituminous Concrete. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 42, 1973, pp. 499–520.

Tender Mixes. Information Series No. 168 (IS-168). Asphalt Institute, Lexington, Ky., 1978, 8 pp. Transportation Research Circular 242: State of the Art: Vibratory Compaction of Asphalt Pavements.

Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., April 1982, 7 pp.

Tunnicliff, D. G. Symposium on Vibratory Compaction of Asphalt Pavement: Introduction. Proceedings, Association of Asphalt Paving technologists, Vol. 46, 1977, pp. 260–264

Vibratory Compaction of Asphalt Paving Mixtures. Educational Series No. 2 (ES-2). Asphalt Institute, Lexington, Ky., June 1978, 12 pp.

Vyce, J. M., L. Hartvigas, and J. W. Reilly. Thick-Lift Flexible Paving. Research Report 9. New York State Department of Transportation, March 1972, 19 pp.

Waller, H. F. Compaction of Hot Asphalt Mixes. Presented at the First Annual South Carolina State Highway Conference, March 1983, pp. 3-1–3-21.

Wester, K. Symposium—Asphalt Paving for the Seventies: Compaction. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 40, 1971, pp. 279–293.

White, S., G. Heiman, R. Besantm, and A. Bergen. Saskatchewan Pavement Cooling Charts: Development of a Tool to Control Paving Operations in Marginal Weather. Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association, Vol. 33, Nov. 1988, pp. 120–153.

Williamson, A. O. Compaction and Compaction Techniques. Bros, Inc., n.d., 16+ pp. Wilson, J. E., and R. G. Hicks. Evaluation of Construction and Short-Term Performance Problems for Asphalt Pavements in Oregon. Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 48, 1979, pp. 1–28.

Winslow, M. S. Adjustment for Asphalt Pavers. Louisiana Department of Highways Research and Development Section, n.d., 23 pp.

Wolters, R. O. Modern Concepts for Density Control, Phase I: Bituminous Wearing Courses. Investigation 191. Minnesota Department of Highways, 1973, 51 pp.

Worthan, G. R., and L. F. Erickson. Determination of the Effect of Environmental Temperatures on Compaction of Asphaltic Pavements. Research Project 54. Idaho Department of Highways, July 1970, 88 pp

"Este documento es una traducción no autorizada de un documento de libre acceso que se decidió traducir como insumo de consulta para los estudiantes de la carrera de ingeniería civil."

ENCARGADOS DE EJECUTAR LA TRADUCCIÓN

APELLIDOS Y NOMBRES	Paginas Asignadas	
BELDUMA GARNICA TITO ANDRES	1	4
BENAVIDES BENAVIDES RICARDO JAVIER	5	7
BENITEZ LANCHE DAVID ALEXANDER	8	10
CALVA LITARDO VERONICA GUADALUPE	11	14
CAMACHO HERRERA LUIS EFREN	15	17
CAMPOVERDE LOYOLA SEBASTIAN FERNANDO	18	20
CARPIO VILLARREAL JHANDRY ESTEBAN	21	23
CARVALLO VALAREZO JUAN FRANCISCO	24	26
CELI FERNANDEZ CARLOS FRANCISCO	27	29
CORDOVA ALVAREZ ALEXIS FERNANDO	30	32
CORDOVA QUITO CARLOS DAVID	33	35
CUENCA RIOS LUIS ENRIQUE	36	38
DELGADO MONTOYA KEVIN ANDRES	39	41
DELGADO PULLAGUARI DAMIAN ALDAIR	42	44
GAONA CAMPOVERDE JEAN PIERRE	45	47
GRANDA LLIVICHUZCA PABLO JOSUE	48	51
GUALAN ROMERO MANUEL ALBERTO	52	54
GUAMAN GUACHIZACA FELIPE RAMIRO	55	57
JAPON LEON JIMMY ALEXANDER	58	60
LOAIZA AGUIRRE BRUNO ISRAEL	61	63
LOAIZA ARPI JORGE JAVIER	64	66
LOPEZ PARDO JEFFERSON DAVID	67	69
LOYOLA ALAMA LEONEL ALEJANDRO	70	72
MENA CALDERON MATEO NICOLAS	73	75
MINGA VALDEZ MARIA PAULA	76	78
MONTAÑO ARMIJOS JORGE LUIS	79	81
NORIEGA VERA ARIANA BELEN	82	84
OCHOA GORDILLO JOSUE ISAI	85	87
OJEDA MERINO KEVIN ALEXANDER	88	90
ORTEGA ROSALES ANGEL ULISES	91	93
ORTEGA YAGUANA EMILY VERONICA	94	96
PATINO UCHUARY JORGE FERNANDO	97	99
PUNIN CORTEZ MATEO EDUARDO	100	102
REINOSO RAMOS EVELYN CATHERINE	103	105
RIOS QUINCHE FERNANDO JOSUE	106	108
SARANGO GONZALEZ NICOLAS SEBASTIAN	109	111
SARITAMA HIDALGO PAULO CESAR	112	114
TACURI GUAMAN KEVIN ISRAEL	115	117
AGUILAR CARAGUAY CARMEN OTILIA	118	120
ALBAN ROMERO ANDDY JHAIR	121	124
ALEJANDRO CAMACHO BRYAN ARIEL	126	128
ANGAMARCA SALINAS MANUEL SEBASTIAN	129	131
ARMIJOS SALINAS MYRIAN JAHELA	132	134
BECERRA ORTIZ GÉNESIS DANJHELY	135	137

BRAVO CASTILLO MARIA DE LA NUBE	138	140
CARRION SALINAS PAULA DANIELA	141	143
COFRE BETANCOURT DANIEL RODRIGO	144	146
ESPARZA GUACHISACA PABLO CESAR	147	149
FAJARDO GUAMAN CARLOS ARMANDO	150	152
FEIJOO VEINTIMILLA CARLOS FERNANDO	153	155
GUAMAN CARDENAS EDDY ALEXANDER	156	158
GUERRERO GUARNIZO OSCAR DAVID	159	161
IÑIGUEZ CONDE NICOLAS ANDRES	162	164
JIMENEZ SIMBAÑA EDUARDO JAVIER	165	167
JUMBO TENECHAGUA SOFIA DAYANARA	168	170
LITUMA ARELLANO DAVID ALEJANDRO	171	173
LOJÁN RAMIREZ JUAN	174	176
MACAS JIMENEZ JHOSSUETT DANIEL	177	179
ORDOÑEZ PADILLA ANDRES DAVID	180	182
ORTIZ GUARNIZO ARIANNA ROMYNA	183	185
PEREIRA CABRERA JUAN CARLOS	186	188
PINTADO SALAZAR MARILU KATHERINE	189	191
PULLAGUARI QUEZADA NAYELI KRISBEL	192	194
RAMON CHALAN NAYELI MISHELLE	195	197
RIVAS MORA ERALDO MAURICIO	198	200
RODRIGUEZ CUMBICUS MIGUEL ANGEL	201	203
RODRIGUEZ TAPIA JHON PATRICIO	204	206
SANMARTIN JARAMILLO MICHAEL	207	209
SANMARTIN PUCHAICELA EDISSON DAVID	210	212
SANTORUM LUDEÑA HAMILTON ANDRES	213	215
SILVA OCHOA CESAR AUGUSTO	216	218
VIVANCO JIMENEZ KAREN DANIELA	219	221
VIZHÑAY OJEDA MANUEL ANTONIO	222	224
ZUÑIGA LEON NAHIM ISAAC	225	228

ENCARGADOS DE ASIGNAR LAS SECCIONES CORRESPONDIENTES

CUENCA RIOS LUIS ENRIQUE
LOPEZ PARDO JEFFERSON DAVID
AGUILAR CARAGUAY CARMEN OTILIA
CARRION SALINAS PAULA DANIELA

ENCARGADOS DE REVISAR DE MANERA GENERAL LA TRADUCCIÓN

AUCAPIÑA BELTRAN ANAHI DE LOS ANGELES
LOAIZA EGUIGUREN SANTIAGO MATEO
RIOS AREVALO JUAN DIEGO
CARRILLO ACARO DARIO JAVIER
FLORES GRANDA ALEJANDRA NATHALY
MONTANO GALVEZ MARCO JOSE
RIVERA TUSA SARA ALEJANDRA